

Výroba z fotovoltaické elektrárny na budově CPIT III

Photovoltaic power plant production on the CPIT III building

Bc. Daniel Sliwka

Diplomová práce

Vedoucí práce: Ing. Tadeusz Sikora, Ph.D.

Ostrava, 2021

Poděkování

Děkuji vedoucímu mé diplomové práce panu Ing. Tadeuszi Sikorovi Ph.D. za odborné a účelné konzultace během zpracovávání mé diplomové práce.

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá výrobou hybridní fotovoltaické elektrárny ve vybraném období, která pracuje v ostrovním režimu a je umístěna na nové budově Centra pokročilých inovačních technologií v areálu Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava v Ostravě-Porubě. První tři kapitoly se zabývají spíše teorií a fakty k dané problematice. V první kapitole se dozvídáme o charakteristice budovy, jejími možnostmi a vybavením. Druhá kapitola se týká samotného fotovoltaického systému. Je zde popsán celý funkční systém elektrárny a také použité technologie a zařízení. Třetí kapitola pojednává o popisu aplikace PV GIS, ve které byla simulována výroba dané fotovoltaické elektrárny. Tato simulace je zpracována ve čtvrté kapitole, kde jsou pro lepší přehled doloženy grafy a tabulky. V páté kapitole jsou shrnuty naměřené reálné hodnoty vyrobené energie. Zároveň je zde porovnání naměřených dat s modelovými daty předpovězenými aplikací PV GIS. Výsledky jsou opět zpracovány do přehledných tabulek a grafů. V závěru jsou stručně popsány jednotlivé kapitoly a vlastní postoj ke všem dosaženým výsledkům.

Klíčová slova

Fotovoltaická elektrárna, PV GIS, výroba, spotřeba, energie, výkon, fotovoltaické panely, sluneční záření

Abstract

This diploma thesis deals with production of photovoltaic power plant in chosen period, which works off-grid and is located at the new building – Center for advanced innovative technologies in the premises of VŠB – Technical University of Ostrava in Ostrava-Poruba. First three chapters are dealing with mostly theory and facts to said problematics. In the first chapter we will learn characteristics of the building, its options and equipment. In the second chapter we will learn about the photovoltaic system itself. There is description of the whole functional system of the power plant and also used technologies and equipment. The third chapter speaks about the description of the application PV GIS in which the production of a given photovoltaic power plant was simulated. This simulation is elaborated in the fourth chapter, where graphs and tables are documented for a better overview. The fifth chapter summarizes the measured real values of energy produced. At the same time, there is comparison of measured data with model data predicted by the PV GIS application. The results are again processed into clear tables and graphs. In the end, the individual chapters are briefly described and there is also my own evaluation to all achieved results.

Key words

Photovoltaic power plant, PV GIS, production, consumption, energy, power, photovoltaic panels, solar irradiance

Obsah

Seznam použitých symbolů a zkratk.....	6
Seznam ilustrací a seznam tabulek.....	8
Úvod	10
1. Platforma nových technologií FEI CPIT III	12
1.1. Charakteristika budovy.....	12
1.2. Vybavení a možnosti budovy.....	13
2. Fotovoltaická elektrárna na budově CPIT III.....	14
2.1. Zařízení a technologie elektrárny	14
2.2. Funkční systém HFVE.....	15
3. Fotovoltaický geografický informační systém	17
3.1. Dostupné databáze a výpočetní nástroje PV GIS	18
3.1.1. Fotovoltaický systém „grid connected“	19
3.1.2. Fotovoltaický systém „Tracking PV“	20
3.1.3. Fotovoltaický systém „off-grid“	21
3.1.4. Průměrné měsíční údaje o slunečním záření	22
3.1.5. Průměrné denní údaje o slunečním záření.....	22
3.1.6. Průměrné hodinové údaje o slunečním záření.....	22
3.1.7. Typický meteorologický rok „TMY“	23
4. Předpoklad výroby FVE v aplikaci PV GIS	24
4.1. Předpoklad výroby FVE s databází PV GIS-SARAH.....	25
4.2. Předpoklad výroby FVE s databází PV GIS-COSMO	27
4.3. Předpoklad výroby FVE s databází PV GIS-ERA5	30
4.4. Zhodnocení výsledků vybraných databází.....	32
5. Skutečná výroba elektrické energie FVE	34
5.1. Porovnání modelové výroby jednotlivých měsíců s naměřenými hodnotami.....	36
5.1.1. Výroba za měsíc listopad	36
5.1.2. Výroba za měsíc prosinec	37
5.1.3. Výroba za měsíc leden.....	38
5.1.4. Výroba za měsíc únor	40
5.1.5. Výroba za měsíc březen.....	41
5.1.6. Výroba za měsíc říjen.....	42
5.2. Srovnání vybraných dní z každého měsíce	44
5.3. Grafické srovnání naměřených dat s modelovou předpovědí PV GIS.....	46
6. Závěr	47

Seznam použitých symbolů a zkratek

<i>A</i>	Ampér, jednotka elektrického proudu
<i>AC</i>	Alternating current
<i>Ah</i>	Ampérhodina, jednotka pro kapacitu baterie
<i>BMS</i>	Battery management system
<i>CdTe</i>	Tellurid kademnatý
<i>CO₂</i>	Oxid uhličitý
<i>CM SAF</i>	The Satellite Application Facility on Climate Monitoring
<i>CPIT III</i>	Centrum pokročilých inovačních technologií III
<i>CSV</i>	Comma separated values
<i>ČHMÚ</i>	Český hydrometeorologický úřad
<i>DC</i>	Direct current
<i>E</i> (J)	Energie
<i>ECMWF</i>	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
<i>FEI</i>	Fakulta elektrotechniky a informatiky
<i>FV</i>	Fotovoltaika
<i>FVE</i>	Fotovoltaická elektrárna
<i>h</i>	Hodina, jednotka času
<i>HFVE</i>	Hybridní fotovoltaická elektrárna
<i>km/h</i>	Kilometr za hodinu, jednotka rychlosti
<i>kWh</i>	Kilowatthodina, odvozená jednotka energie
<i>kW</i>	Kilowatt, násobek základní jednotky výkonu
<i>kWp</i>	Kilowatt-peak, jednotka špičkového výkonu fotovoltaické elektrárny
<i>LDS</i>	Lokální distribuční síť
<i>m</i>	Metr, základní jednotka délky
<i>mm</i>	Milimetr, jednotka délky
<i>MPPT</i>	Maximum power point tracking
<i>MTP</i>	Měřicí transformátor proudu
<i>NO₂</i>	Oxid dusičitý
<i>NREL</i>	National Renewable Energy Laboratory
<i>NSRDB</i>	National Solar Radiation Database

<i>P</i>	(W)	Výkon
<i>PV GIS</i>		Photovoltaic Geographical Information System
<i>s</i>		Sekunda, jednotka času
<i>SO₂</i>		Oxid Siřičitý
<i>t</i>	(s)	Čas
<i>TMY</i>		Typical meteorological year
<i>Txt</i>		Text, formát souboru
<i>UPS</i>		Uninterruptible Power Supply
<i>V</i>		Volt, jednotka napětí
<i>VŠB – TU Ostrava</i> Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava		
<i>Wp</i>		Watt-peak, jednotka špičkového výkonu fotovoltaické elektrárny
<i>W/m²</i>		Watt na metr čtvereční, jednotka intenzity záření
<i>ZTP</i>		Zvlášť těžké postižení
°		Úhlový stupeň, jednotka velikosti úhlu
°C		Stupeň Celsia, jednotka teploty

Seznam ilustrací a seznam tabulek

Obr. 1: Nová budova CPIT III. [3]	12
Obr. 2: Fotovoltaické panely na střeše budovy. [8]	14
Obr. 3: Situační schéma HFVE. [7]	15
Obr. 4: Část fotovoltaického pole panelů na střeše budovy.	16
Obr. 5: Uživatelské rozhraní PV GIS. [5]	17
Obr. 6: Příklad grafu obzoru a srovnání se snímkem rybího oka ze stejného místa. [5]	18
Obr. 7: Mapa světa s databázemi slunečního záření v PV GIS. [5]	19
Obr. 8: Vstupní data pro výpočet grid-connected systému. [5]	19
Obr. 9: Výsledek výpočtu pro grid-connected systém. [5]	20
Obr. 10: Vstupní data pro výpočet tracking PV systému. [5]	21
Obr. 11: Výstup nástroje pro výpočet off-grid systému. [5].....	21
Obr. 12: Průměrná měsíční teplota v roce 2016 pro zvolené místo. [5]	22
Obr. 13: Průměrné denní sluneční záření pro měsíc červen. [5].....	22
Obr. 14: Vstupní data pro výpočet hodinových hodnot. [5]	23
Obr. 15: Rozložení panelů FVE na budově CPIT III. [6]	24
Obr. 16: Vstupní data pro výpočet sekce A. [5].....	25
Obr. 17: Výsledek výpočtu sekce A s databází PV GIS-SARAH. [5]	25
Obr. 18: Vstupní data pro výpočet sekce B. [5].....	26
Obr. 19: Výsledek výpočtu sekce B s databází PV GIS-SARAH. [5]	26
Obr. 20: Graf vyrobené elektrické energie fotovoltaického systému s databází PV GIS-SARAH.	27
Obr. 21: Výsledky výpočtu sekce A s databází PV GIS-COSMO. [5].....	28
Obr. 22: Výsledek výpočtu sekce B s databází PV GIS-COSMO. [5].....	28
Obr. 23: Graf vyrobené elektrické energie fotovoltaického systému s databází PV GIS-COSMO.....	29
Obr. 24: Výsledky výpočtu sekce A s databází PV GIS-ERA5. [5]	30
Obr. 25: Výsledky výpočtu sekce B s databází PV GIS-ERA5. [5]	30
Obr. 26: Graf vyrobené elektrické energie fotovoltaického systému s databází PV GIS-ERA5.	31
Obr. 27: Detailní foto FV panelů.....	34
Obr. 28: Dispozice monitoringu FVE. [9]	35
Obr. 29: Graf desetiminutových hodnot vyrobené energie za měsíc listopad.	37
Obr. 30: Graf desetiminutových hodnot vyrobené energie za měsíc prosinec.....	38
Obr. 31: Graf desetiminutových hodnot vyrobené energie za měsíc leden.	39
Obr. 32: Lednová výška sněhové pokrývky na stanici ČHMÚ v Ostravě-Mošnově. [10]	39
Obr. 33: Graf desetiminutových hodnot vyrobené energie za měsíc únor.....	40
Obr. 34: Únorová výška sněhové pokrývky na stanici ČHMÚ v Ostravě-Mošnově. [10].....	40
Obr. 35: Graf desetiminutových hodnot vyrobené energie za měsíc březen.	41
Obr. 36: Graf desetiminutových hodnot vyrobené energie za měsíc říjen.	42
Obr. 37: Porovnání délky slunečního svitu ve dnech 2.10. a 24.10. [11]	43
Obr. 38: Denní výroba energie ve vybraných dnech.	44
Obr. 39: Výška slunce nad obzorem.....	45
Obr. 40: Srovnání naměřených dat s modelovou předpovědí.	46
 Tabulka 1: Specifikace FV elektrárny na budově CPIT III.	24
Tabulka 2: Měsíční hodnoty vyrobené energie sekce A podle databáze PV GIS-SARAH.	25
Tabulka 3: Měsíční hodnoty vyrobené energie sekce B podle databáze PV GIS-SARAH.	26
Tabulka 4: Měsíční hodnoty vyrobené energie celé FV elektrárny podle databáze PV GIS-SARAH.	27
Tabulka 5: Měsíční hodnoty vyrobené energie sekce A podle databáze PV GIS-COSMO.....	28

Tabulka 6: Měsíční hodnoty vyrobené energie sekce B podle databáze PV GIS-COSMO.....	29
Tabulka 7: Měsíční hodnoty vyrobené energie celé FV elektrárny podle databáze PV GIS-COSMO....	29
Tabulka 8: Měsíční hodnoty vyrobené energie sekce A podle databáze PV GIS-ERA5.....	30
Tabulka 9: Měsíční hodnoty vyrobené energie sekce B podle databáze PV GIS-ERA5.....	31
Tabulka 10: Měsíční hodnoty vyrobené energie celé FV elektrárny podle databáze PV GIS-ERA5.....	31
Tabulka 11: Srovnání vyrobené roční energie.....	32
Tabulka 12: Srovnání dvou nejméně produktivních měsíců.	32
Tabulka 13: Srovnání výroby v měsíci březnu a září.....	33
Tabulka 14: Měsíce s nejvyšší produkcí od každé databáze.....	33
Tabulka 15: Srovnání výroby obou částí elektrárny u všech databází.	33
Tabulka 16: Tabulka pro příklad přepočtu.	34
Tabulka 17: Hodnoty vyrobené energie.	36
Tabulka 18: Výroba částí elektrárny měřena přes jednotlivé MPPT regulátory za listopad.	37
Tabulka 19: Výroba částí elektrárny měřena přes jednotlivé MPPT regulátory za prosinec.	38
Tabulka 20: Výroba částí elektrárny měřena přes jednotlivé MPPT regulátory za leden.	39
Tabulka 21: Výroba částí elektrárny měřena přes jednotlivé MPPT regulátory za únor.	41
Tabulka 22: Výroba částí elektrárny měřena přes jednotlivé MPPT regulátory za březen.	42
Tabulka 23: Výroba částí elektrárny měřena přes jednotlivé MPPT regulátory za říjen.....	43

Úvod

Elektrická energie se stává čím dál důležitějším prostředkem pro náš obyčejný život. Nedostatek nebo přerušení dodávky elektrické energie způsobuje velké problémy v dopravě, službách, průmyslu, ve výrobě nebo v domácnostech. Prakticky každý z nás již ve svém životě zažil alespoň na pár minut situaci, jak by vypadal svět bez elektřiny. Místa, kde je potřeba mít k dispozici elektrickou energii, jsou zálohována sekundárními zdroji. Ovšem tyto zdroje v drtivé většině případů nedokážou dlouhodobě nahradit kontinuální připojení k elektrické distribuční síti.

Aby byly uspokojeny nároky na elektřinu po celém světě, je třeba vyrábět elektřinu mimo jiné ve velkých jaderných a tepelných elektrárnách. Ovšem názor na jadernou energetiku je z důvodu bezpečnosti stále rozporuplný. Hlavním producentem elektrické energie jsou tepelné elektrárny. Tyto elektrárny produkují velké množství emisí CO_2 , SO_2 , NO_2 , což je jedním z nejsledovanějších hledisek při výrobě elektrické energie v moderní energetice. Opatření v Evropě se záměrem snížení škodlivých látek v ovzduší a zlepšení klimatických podmínek zavádí z velké části Evropská unie. Elektrárny spalující černé a hnědé uhlí, plyn či olej, investovaly v posledních letech miliardové částky do technologií pro snížení emisí tak, aby vyhovovaly povoleným hodnotám. Ovšem ani to není zárukou toho, abychom byli pasivní v cestě za hledáním nových využitelných zdrojů k výrobě elektrické energie.

Trendem 21. století je boom alternativních zdrojů elektrické energie. Mezi alternativní zdroje řadíme větrné elektrárny, fotovoltaické panely, vodní (přečerpávací, průtočné, akumulační, přílivové) nebo biomasu, popř. geotermální elektrárny. Důvodem zvyšujícího se podílu alternativních zdrojů na vyrobené energii je jejich částečně bezemisní provoz a nevyčerpatelný zdroj energie. Důležité je si také uvědomit, že zásoby uhlí, ropy a zemního plynu se postupem času vyčerpají, a proto je třeba vyhledávat jiné způsoby pro výrobu elektrické energie.

Například elektrárna Dětmarovice, největší černouhelná elektrárna v České republice, oznámila v tomto roce, že nejpozději v roce 2023 odstaví tři uhelné bloky o celkovém výkonu 600 MW. Tyto tři výkonné bloky budou nahrazeny moderními kogeneračními jednotkami na plyn, které zajistí výrobu elektřiny a zároveň umožní pokračovat v dodávkách tepla do blízkých měst a obcí. Jedním z důvodů přestavby této elektrárny je i končící těžba v Ostravsko-karvinské uhelné pánvi společností OKD. V roce 2021 byly zavřeny další dva doly, Armáda a Darkov, z důvodu nerentabilního pokračování další těžby a v provozu již tak zůstaly pouze doly ČSM jih a ČSM sever. I tyto doly ale společnost OKD plánuje v brzké době uzavřít. Rozdíl v tomto směru najdeme třeba v Německu, které se rozhodlo své černouhelné doly zakonzervovat. V případě fatálního nedostatku surovin by se mohla těžba částečně obnovit, což v případě České republiky není možné. Rozdíl mezi jednotlivými státy je i v názoru na jadernou energetiku. V Česku se připravuje tendr na dostavbu jaderné elektrárny Dukovany. Zatímco v Německu, Francii nebo ve Švýcarsku se jaderné elektrárny odpojují z provozu. Rozdíl v těchto vyjmenovaných státech a Českou republikou je ovšem v poloze. Česká republika je vnitrozemský stát, tudíž zde nelze aplikovat vodní přílivové elektrárny, nebo velké offshore větrné parky, které jsou umístěné nedaleko německého, holandského či dánského pobřeží. Rakousko se Švýcarskem zase mají výhodu, že se velká část jejich území nachází v nejvyšším evropském pohoří v Alpách. V pohoří, kde vrcholky dosahují výšky přes čtyři tisíce metrů, najdou své využití akumulační vodní elektrárny a taky díky velkému spádu i přečerpávací vodní elektrárny. Geotermální energie má velký podíl na celkové výrobě elektrické energie na Islandu.

Vysoká škola báňská v Ostravě jde ve stopách moderní elektroenergetiky a získává elektrickou energii z fotovoltaických panelů umístěných na střeších budov. V areálu v Ostravě-Porubě je i malá větrná elektrárna s asynchronním generátorem. Předmětem mé diplomové práce je nejnovější

hybridní fotovoltaická elektrárna v areálu VŠB, která vznikla na nedávno postavené budově CPIT III. Tento fotovoltaický systém byl navrhnut pro ostrovní provoz. Elektrárna má pokrývat celou denní spotřebu. V případě přebytku je výroba korigována MPPT regulátory, systém totiž nedovoluje přetoky do distribuční sítě. V případě plánované odstávky, nebo nedostatku vyrobené energie z fotovoltaického pole, je povoleno nabití systému osmi baterií z lokální distribuční sítě.

1. Platforma nových technologií FEI CPIT III

Systém hybridní fotovoltaické elektrárny je umístěn na střeše nové budovy Centra pokročilých inovačních technologií Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava. Cílem tohoto vědecko-výzkumného centra je vývoj moderních aplikací, systémů a technologií, které mají trvalé využití v průmyslu 4.0. Budova svou vizualizací zapadá do moderního kampusu v Ostravě-Porubě a umožňuje zkvalitnění studia budoucích studentů, akreditaci novým oborům a prohloubení výzkumů v oblasti automotive, smart factory a home-care. Kromě využití pro fakultu elektrotechniky a informatiky bude komplex přínosem i pro ostatní fakulty jako je fakulta strojní či bezpečnostního inženýrství.

1.1. Charakteristika budovy

Stavba této moderní budovy byla zahájena v září roku 2018. Dokončení hrubé stavby se datovalo na březen 2020. Provizorní provoz začal na začátku akademického roku 2020/21 a finální integrace všech technologií skončila koncem roku 2020. Celkové náklady na stavbu a vybavení se vyšplhaly na 164,5 milionů korun. [1]

Komplex se skládá ze tří navzájem prolínaných kubusů s odlišným počtem podlaží. Východní kubus je jednopodlažní o rozměrech 11,5 x 21,3 m. Třípodlažní západní kubus má rozměr 17,75 x 21,25 m. Třetí podlaží je rozměrově menší, a to 12,7 x 13,05 m. Střední část, kde se nachází hlavní vchod do objektu, je čtyřpodlažní s jedním podzemním patrem. Rozměr podlaží je 12,33 x 18,36 m a stejně jako západní kubus má 3. nadzemní patro menší, a to o rozměrech 6,95 x 12,68 m. K východnímu bloku také navazuje trafostanice a kryté stání pro dva elektromobily a ZTP. Konstrukce je navržena jako kombinace stěnového systému s železobetonovým skeletem. Hliníková okna jsou vyplněna izolačním trojsklem. Pro vytápění objektu je užito tepelné čerpadlo. Střecha je provozně přístupná a osazená zmiňovanou hybridní fotovoltaickou elektrárnou. [2] [3]



Obr. 1: Nová budova CPIT III. [3]

1.2. Vybavení a možnosti budovy

Moderní komplex se řadí k budovám umožňující sledovat a řídit energetické toky u elektrických zařízení a instalovaných technologií včetně osvětlení, topení, ventilace, chlazení apod. Schopnost vysoko objemových datových přenosů a ukládání velkokapacitních dat se zde využívá k simulování výrobního procesu. Místnosti a chodby jsou prošpikovány senzorickými systémy a k dispozici je také rychlonabíjecí stanice pro elektromobily. [1]

Nadčasový building management systém, kde všechny technické systémy a funkce jsou integrovány v jedné ovládací stanici, umožňuje přehledně, a hlavně s velkou energetickou účinností, automatizovat chod celé budovy. [1]

V budově je integrovaná specifická senzorická síť optických vláken pod podlahou ve zdech, nosné konstrukci či v přístupových místech, která dokáže sledovat zatížení podlah, monitorovat vibrace spuštěných technologií, teplotu a koncentraci plynů v ovzduší. Je tady také schopnost identifikovat osoby pro vstup neoprávněných lidí na pracoviště apod. Komplex je energeticky a datově propojen s parkovacím domem, který se nachází vedle CPIT III. V budoucnu se plánuje rozvoj této spolupráce, kdy by se parkovací dům stal zároveň dobíjecí stanicí pro elektromobily formou nabíjecích kontejnerů. Propojení je zhotoveno optickým kanálem s rychlostí 10 Gbitů pro vysoko objemové datové přenosy, kterým je zároveň tato část areálu spojena s budovou fakulty elektrotechniky a informatiky a starší budovou Centra pokročilých inovačních technologií. [1]

Budova funguje na principu testbedu. Hlavním odvětvím, kterým se lze v budově zabývat, je Automotive, Home Care a Smart Factory, které jsou následovně přesněji popsány.

Smart Factory

Jedná se o robotizovanou a digitalizovanou výrobní linku s prvky Průmyslu 4.0. Do budoucna se zde plánuje zavést automatizovaná výroba vlastních produktů fakulty FEI. Linka bude sloužit kromě výuky a testování i k výrobě produktů složených z dílů, které dodává centrum 3D tisku. Další schopností výrobní linky je skládat produkty z kostek Lego, které nabízí velkou variabilitu montáže. [1]

Home Care

V horním patře se nachází testovací byt, který je plný nejnovějších senzorů, technologií a ovladačů v oblasti home care. Lze zde simulovat život lidí a jejich chování v domácnosti. Díky tomu mohou studenti se svými mentory vyvíjet technické prostředky pro zvýšení komfortu bydlení. Využití zde najdou studenti biomedicínského inženýrství a telemedicíny.[1]

Automotive

Své zastoupení má zde automotive v podobě laboratoří a nabíjecích stanicí pro elektrická a plug-in hybrid vozidla. Dvě venkovní nabíjecí stanice dokážou pracovat až do režimu supercharging. V oddělení jízdních testů je aktivní dynamometr do rychlosti 330 km/h a výkonu 2000 kW. Testovat zde tedy lze jízdní vlastnosti vozidel s konvenčním, hybridním nebo elektrickým pohonem. Právě díky těmto testům je na střeše budovy patrná mohutná vzduchotechnika. Oddělení funkční bezpečnosti se zabývá programováním, simulováním a testováním asistenčních systému pro autonomní jízdu automobilů a průmyslových vozidel. Univerzita zde spolupracuje na několika projektech s významnými světovými automobilkami. [1]

2. Fotovoltaická elektrárna na budově CPIT III

Elektrárna slouží k celoročnímu napájení budovy a zálohování části rozvodů. Zdroj elektrické energie zajišťuje 80 monokrystalických fotovoltaických panelů umístěných na střeše, kde na ně dopadá sluneční záření. Jeden panel má rozměr 1640 x 992 mm. Část panelů, konkrétně 39, je orientovaných na jih (185°). Druhá část elektrárny se 41 panely je orientována více na jihozápad (211°). Tyto dvě části tvoří jeden celek elektrárny s 80 panely o celkovém výkonu 24,8 kWp, které mají sklon vůči vodorovné ploše 15° . Celková plocha fotovoltaického generátoru je 130 m^2 . Pohled z dronu na elektrárnu je na následujícím obrázku. Provoz elektrárny probíhá v grid-paralelním režimu s podporou distribuční sítě. K napájení budovy z distribuční sítě dojde při překročení povolených limitů. Před plánovaným odpojením od zdroje elektrické energie systém umožňuje ruční přednabití baterií z vnější distribuční sítě. [4]



Obr. 2: Fotovoltaické panely na střeše budovy. [8]

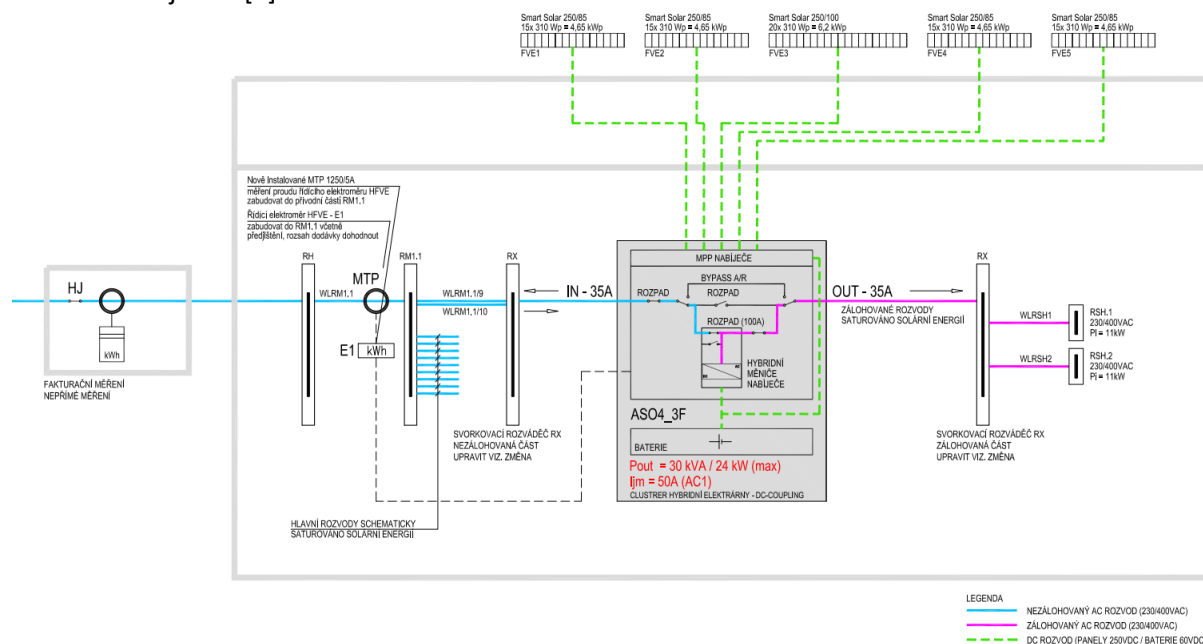
2.1. Zařízení a technologie elektrárny

Veškerá technologie elektrárny, kromě panelů a baterií, je umístěna v kompaktní rozváděcí skříni ASO4-3F. Obsahuje hybridní měniče, MPPT nabíječe, monitoring a chránící obvody či prvky jako jsou jističe panelů, jištění baterií, jištění stejnosměrných vstupů měničů, napáječů, přepětové ochrany, rozpadový stykač, automaticky stykačový bypass a ruční bypass. Rozvaděč je instalován v druhém náhorním patře v technické místnosti vedle baterie, která se skládá z 8 bloků. Jednotlivé bloky baterií jsou připojeny na stejnosměrný sběrníkový systém, který je součástí rozvaděče. Řídicí systém elektrárny, který se nachází v rozvaděči, je propojen komunikačním a datovým vedením s baterií. Pro vzdálený monitoring systému je do rozvaděče přivedena přípojka k internetu FTP Cat5e. Všechny 8 baterií mají stejnou jmenovitou kapacitu 121,5 Ah. Celková stejnosměrná kapacita baterií je tedy 972 Ah, což při jmenovitém napětí 55,5V odpovídá asi 53,9 kWh. Maximální vybíjecí proud těchto baterií je 300 A po dobu 3 s. [4]

Odvod z hlavního rozvaděče ASO4-3F zajišťuje vodič CYKY-J 5x16, který vede do svorkového rozvaděče RX. Z tohoto rozvaděče jsou napájeny zálohované rozvody budovy (modelové byty). Nezálohovaný AC přívod je veden z distribuční sítě přes fakturační měření do rozvaděče RH. Za rozvaděčem RH následuje rozvaděč RM1.1, kde je umístěn trojfázový měřicí transformátor proudu (MTP) a řídicí elektroměr HFVE, který je současně připojen komunikačním vedením k hlavní rozváděcí skříni celé technologie ASO4-3F. Tato měřicí sonda má za úkol kontrolu přetoku energie do lokální distribuční soustavy. Nezálohovaný rozvod od lokální distribuční soustavy dále vede do svorkového

rozvaděče RX, z kterého je, stejně jako zálohovaný rozvod, propojen s clusterem celé elektrárny ASO4-3F vodičem CYKY-J 5x16. [4]

Fotovoltaické panely jsou namontované na speciální betonové bloky. Jsou zapojeny do několika skupin sérioparalelním zapojením. Propojení je provedeno solárními kabely 6 mm². Elektrárna je prakticky rozdělena do pěti skupin FVE1 až FVE5. Skupiny 1 a 2 jsou zapojeny jako tři paralelní stringy po pěti panelech. Skupina panelů 3 je v zapojení 4 x 5 panelů v sérii. Skupina panelů 4 a 5 je v konfiguraci 2+3 stringy paralelně. Každá jednotlivá skupina panelů 1, 2, 4, 5 je přiřazena k MPPT nabíječi SmartSolar 250/85. Skupina 3 je připojena na MPPT nabíječ SmartSolar 250/100, protože má nejvyšší instalovaný výkon. Pole panelů jsou propojena vodičem AlMgSi8, který je propojen s jímací soustavou objektu. [4]



Obr. 3: Situační schéma HFVE. [7]

2.2. Funkční systém HFVE

Hybridní systém umožňuje spolupracovat s externím zdrojem elektrické energie, což je v tomto případě lokální distribuční soustava VŠB. Spoluprací se rozumí plynulý přechod na napájení z LDS po možném vybití baterie pod nastavenou hodnotu a návrat k napájení z baterií přes měniče po dobití baterií znovu nad nastavenou mez. Obě tyto meze jsou dány uživatelským nastavením v nastaveném intervalu SOC (State Of Charge). Přechod na podporu a spolupráci s LDS je zajištěn i při překročení jmenovitého výkonu měničů. Systém umožňuje vytlačení výkonu řízeným způsobem i směrem k nezálohovaným obvodům. Pro případ blackoutu přechází zálohová část rozvodů na UPS napájení, což je přechod na napájecí síť a zpět bez přerušování napájení. Při blackoutu zůstávají pod napětím zálohované rozvody na výstupu z ASO4-3F. Vstupní rozvaděčový stykač řízený fázovou síťovou ochranou slouží ke galvanickému odpojení zálohované části HFVE při přechodu do ostrovního módu. V hybridním módu je přebytečná energie z fotovoltaických panelů poskytována jak zálohovaným rozvodům za rozvaděčem ASO4-3F, tak nezálohovaným rozvodům před rozvaděčem. Proti přetoku dále do vnější LDS brání již zmínovaný měřicí elektroměr E1 s MTP sondami v každé fázi. Akumulační systém je pod dohledem BMS (Battery management system), který hlídá přebíjení, podbití, nadproudy, teplotu a další parametry baterie z důvodu, aby bylo dosaženo garantované doby života. Celý bateriový set je využit pro všechny tři fáze společně. Při provozu zařízení ASO4-3F a baterie, vzniká ztrátové teplo, proto je prostor pravidelně kontrolován a větrán, aby okolní teplota nebyla mimo provozní teplotní interval +10

°C až +25°C. Při poklesu okolní teploty pod 0°C totiž ochranný mechanismus provede havarijní odstavení baterie. [4]

Soustava solárních nabíječů MPPT zajišťuje optimální nabíjení baterií ze solárních panelů, popř. pokrývá aktuální spotřebu elektrické energie budovy. Systém HFVE zajišťuje impedanční přizpůsobení panelů, baterií a vstupů nabíječů. Hybridní nabíječe jsou ovládány nabíjecím algoritmem bulk/absorbition/float, který je uživatelsky nastavitelný. Hybridní nabíječe/měniče jsou integrovány s transferovým relé v každé fázi. V systému hybridních měničů je zabudován stykačový automatický bypass, který v případě poruchy hybridního systému zajistí napájení z LDS. Automatický bypass je doplněn ještě ručním bypassem pro napájení zálohovaného rozvodu, kdyby došlo k totálnímu selhání systému. [4]

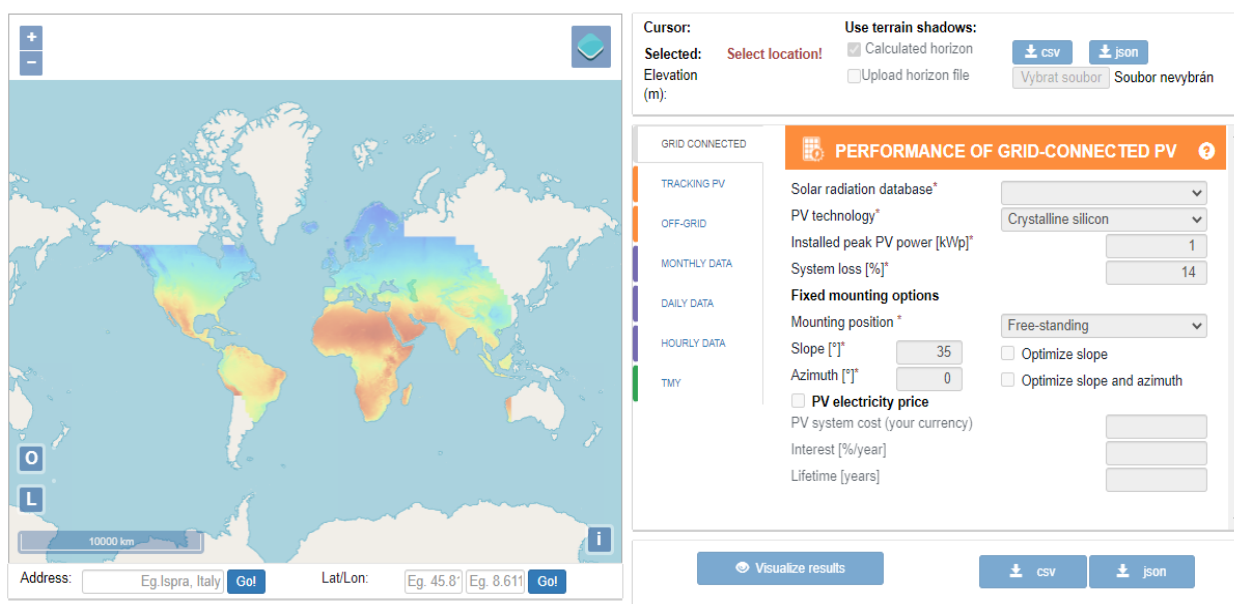
Celý systém je možno sledovat pomocí vizualizace dat na webovém rozhraní. Monitoring sleduje všechna provozní data baterie, hybridních nabíječů a měničů. K dispozici jsou i data o toku energie z i do baterie z fotovoltaických panelů. [4]



Obr. 4: Část fotovoltaického pole panelů na střeše budovy.

3. Fotovoltaický geografický informační systém

Fotovoltaický geografický informační systém (dále jen PV GIS) je aplikace vytvořená společným výzkumným střediskem Evropské komise za účelem zvýšení podílu výroby elektrické energie z obnovitelných zdrojů. Tato aplikace je k dispozici zdarma on-line pomocí webového rozhraní v anglickém, francouzském, italském a španělském jazyce. Pomocí PV GIS dokážeme zjistit údaje o slunečním záření, průměrné teplotě či o výrobě energie z fotovoltaických systémů pro jakékoliv místo v Evropě, Africe a ve velké části Ameriky a Asie. Pro některé oblasti světa ještě nejsou k dispozici všechna data. Může se tedy stát, že pro hledané místo budou k dispozici pouze data o výšce obzoru, ale ne o slunečním záření. Přístup v aplikaci je také k mapám slunečního záření jednotlivých států či větších oblastí. Také lze pomocí PV GIS dohledat pro dané místo data typického meteorologického roku pro devět proměnných klimatických veličin.



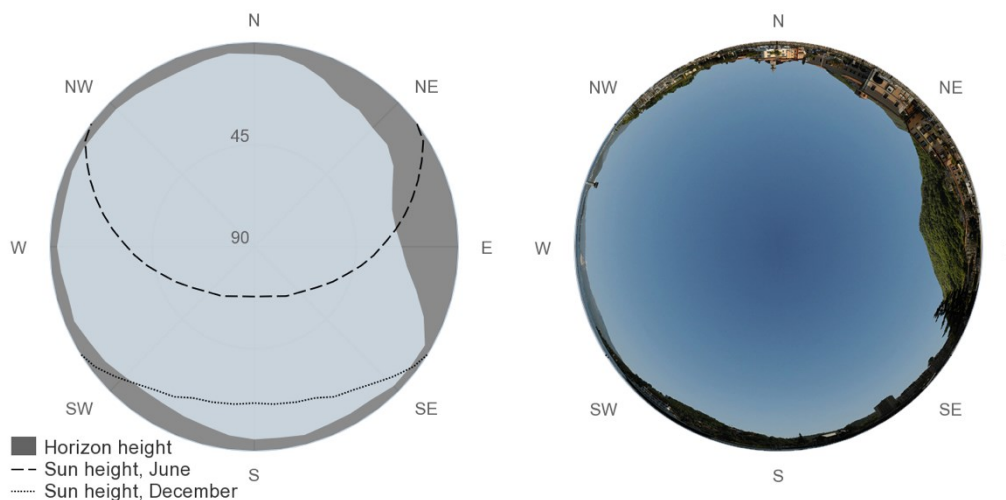
Obr. 5: Uživatelské rozhraní PV GIS. [5]

Výpočetní model využívá údaje jak ze satelitních měření, tak i z meteorologických stanic na zemi. Aplikace umožňuje řadu různých výpočtů, kterým se podrobněji budu zabývat dále. Pro každý výpočet se musí vyplnit vstupní údaje, aby je mohl PV GIS zpracovat a zobrazit výsledky. Výsledky výpočtu lze vidět jako grafy a hodnoty na webové stránce. Zobrazí se pod mapou a polem se vstupními údaji. Ovšem je také možné si vypočtená data stáhnout ve formátu CSV, který je vhodný pro použití s dalšími softwary.

Na levé straně obrázku 5 je interaktivní mapa, kterou si lze přiblížit až na jednotlivé ulice, respektive budovy. Nejprve se musí zadat geografické umístění pomocí názvu města (obce), nebo souřadnic dole pod mapou. Bez tohoto úkonu se neotevře pravá strana, kde se zadávají konkrétní vstupní data. Uprostřed stránky se volí nástroj pro žádaný typ výpočtu. U každého nástroje výpočtu se tedy vstupní data liší.

Pro zlepšení výpočtu slunečního záření a předpokládaného výkonu fotovoltaického systému lze v aplikaci PV GIS využít informace o místním horizontu, který odhalí stínění blízkých kopců a pohoří. Existuje řada možností, které si uživatel může zvolit vpravo nahoře. Výpočet lze provést třemi způsoby s informací o horizontu. Výchozí možností je počítat s informacemi o horizontu integrovanými v PV GIS. Druhou možností je s horizontem vůbec nepočítat. Tato možnost se ovšem promítne do nepřesnosti výsledku výpočtu. Poslední možností je nahrát si soubor s vlastními informacemi o horizontu. Nahrání

soubor musí být ve formátu „txt“, což je klasický textový soubor, nebo ve formátu „csv“. V souboru musí být na každém řádku jedno číslo, které představuje výšku obzoru ve stupních v určitém směru kolem zvoleného místa na mapě. Hodnoty musí představovat stejnou úhlovou vzdálenost kolem obzoru. Pokud je tedy v souboru 20 hodnot, PV GIS předpokládá, že první bod je sever a další je o 18 stupňů východně od severu. Každá hodnota je tedy posunutý obzor ve směru hodinových ručiček až do posledního bodu, který je 18 stupňů západně od severu. Pokud je v souboru 36 hodnot, odpovídá každá hodnota výšce obzoru každých 10 stupňů atp. Většina nástrojů PV GIS, kromě hodinových dat slunečního záření, zobrazí graf horizontu zároveň s výsledkem výpočtu, a to na pravé straně pod uživatelským rozhraním. Graf je zobrazen jako polární graf s výškou obzoru v kruhu.



Obr. 6: Příklad grafu obzoru a srovnání se snímkem rybiho oka ze stejného místa. [5]

3.1. Dostupné databáze a výpočetní nástroje PV GIS

Existuje celá řada dat o slunečním záření používaná v PV GIS, které byly vypočítané ze satelitních snímků. V současné době jsou k dispozici tyto datové řady:

PV GIS-SARAH – Tato datová sada byla poskytnuta týmem PV GIS a CM SAF, což je Využití satelitních zařízení pro monitorování klimatu. Její využití se uplatňuje při výpočtech v Evropě – kromě severu, v Africe, ve většině Asie a části Jižní Ameriky.

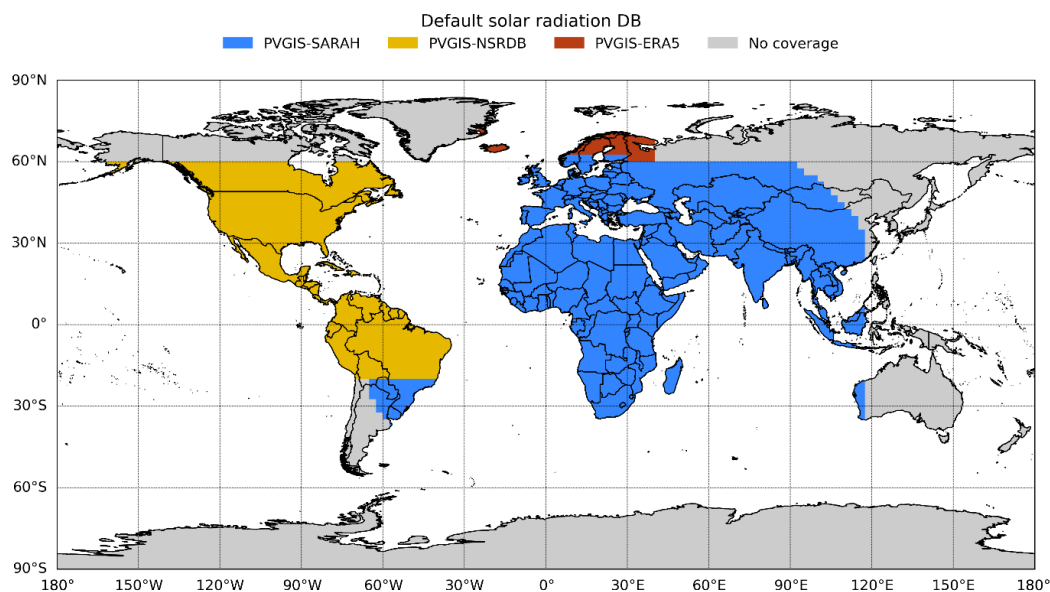
PV GIS-NSRBD – Tento soubor dat poskytla Národní laboratoř pro obnovitelné zdroje energie. (NREL) a je součástí národní databáze slunečního záření. Pokrývá velkou část Severní Ameriky vyjma nejsevernějších oblastí Kanady a Aljašky nad šedesáti stupni zeměpisné šířky, celou Střední Ameriku a asi dvě třetiny Jižní Ameriky bez její jižnějších oblastí.

Značná část světa ještě není satelitními daty pokryta, zejména severní šířky. Proto byly zavedeny další dvě databáze, prozatím pouze pro Evropu.

PV GIS-ERA5 – Toto je nová databáze vytvořena reanalýzou od Evropského centra pro střednědobé předpovědi počasí (ECMWF). Pokrývá je celosvětové s rozlišením 0,28° zeměpisné šířky/délky.

PV GIS-COSMO – Je podobná databázi PVGIS-ERA5, která pokrývá Evropu v hodinovém časovém rozlišení a v prostorovém rozlišení 3' zeměpisné šířky/délky. V roce 2020 by měla být z PV GIS odstraněna.

Pro představu je na následujícím obrázku znázorněná mapa světa se zakreslenými databázemi o slunečním záření.



Obr. 7: Mapa světa s databázemi slunečního záření v PV GIS. [5]

Nástroje aplikace PV GIS nám dávají na výběr, co chceme vypočítat. Možnosti jsou: Grid connected fotovoltaické systémy, tracking fotovoltaické systémy a off-grid systémy. Ty dokážou predikovat výkon, náklady a další věci zmíněných fotovoltaických systémů. Další tři nástroje se týkají průměrného měsíčního, denního a hodinového slunečního záření pro zvolené místo.

3.1.1. Fotovoltaický systém „grid connected“

Při tomto výpočtu výroby energie je předpokládáno, že veškerá vyrobená energie, která se nespotřebuje v místě výroby, bude posílána do distribuční sítě.

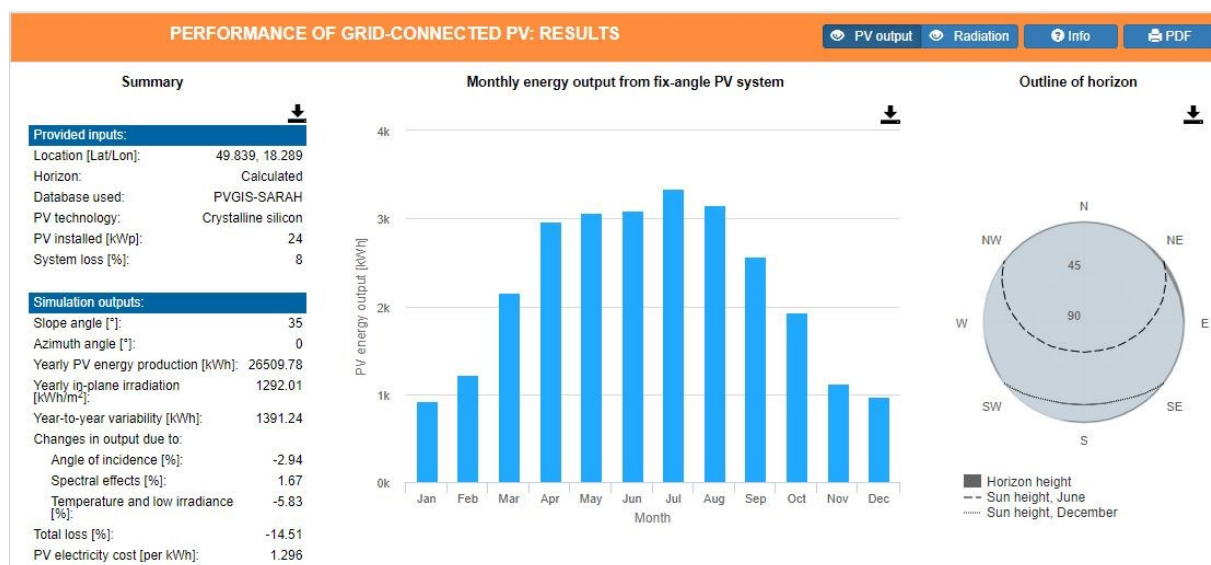
Obr. 8: Vstupní data pro výpočet grid-connected systému. [5]

Prvním vstupním údajem je výběr databáze solárního záření. Databáze je třeba vybrat v závislosti na zvoleném místě na mapě, jak již bylo zmíněno dříve. Druhý údaj se týká fotovoltaické technologie panelů. Na výběr jsou tři klasické typy: Monokrystalické (crystalline silicon), polykrystalické (CIS) a amorfní (CdTe). Dalším údajem je instalovaný špičkový výkon, který výrobce udává při solární

konstantě 1000 W/m² a teplotě 25 °C. Výkon se zadává v řádech kWp. Jako vstupní údaj se zadávají i odhadované ztráty celého systému. Pokud přesná hodnota ztrát není známa, používá se přednastavená hodnota 14 %. Další skupinou vstupních dat potřebných k výpočtu je poloha panelů. Na výběr je zde poloha volně stojících panelů či integrovaných do konstrukce stěny nebo střechy budovy. Důležitým vstupním údajem je také sklon. Sklon je brán jako úhel panelů od vodorovné roviny. Se sklonem je důležité zadat také orientaci. Orientace je úhel vzhledem ke směru na jih. Tedy 0° je jih, - 90° je východ a 90° je západ. Při návrhu fotovoltaického systému je možnost optimalizovat sklon a orientaci, kdy PV GIS vypočítá tyto dva parametry, které by vedly k nejvyššímu výkonu.

PV GIS dokáže vypočítat i náklady na elektřinu vyrobenou fotovoltaickým systémem. Tyto údaje není povinné zadávat, pokud se nám jedná pouze o zjištění výkonu. Při výpočtu se zadávají celkové náklady na nákup a instalaci FV systému v kterékoliv měně, očekávaná životnost FV systému v rocích a úroková sazba v procentech za rok.


Výsledkem finančního výpočtu bude cena za kWh v měně, ve které byla zadána počáteční investice. Výstupem výpočtu výkonu fotovoltaického systému bude sloupcový graf s průměry měsíčních hodnot vyrobené energie během jednoho roku. Na levé straně jsou všechny výsledky seřazeny v řádcích. Získáme údaje o celkové roční produkci fotovoltaického systému či o celkových ztrátách. Ukazatelem myši lze zjistit jednotlivé průměrné měsíční výkony. V pravém horním rohu můžeme přepnout na graf průměrného záření. Pokud zaškrtneme u vstupních údajů počítání s horizontem, zobrazí se ve výsledcích i obrys obzoru.



Obr. 9: Výsledek výpočtu pro grid-connected systém. [5]

3.1.2. Fotovoltaický systém „Tracking PV“

Tento nástroj umožňuje odhadnout výrobu energie z fotovoltaického systému, který mění své úhly vůči slunci. Charakteristické úhly mohou být definovány uživatelem, nebo mohou být vypočítány programem PV GIS pro maximalizaci roční produkce energie. Pro výpočet lze zadat natáčení panelu od západu k východu ve stupních, naklání pod úhlem od země nebo kombinací těchto dvou pohybů. Stejně jako u předešlého systému grid-connected jsou potřebná vstupní data: databáze slunečního záření, typ panelů, instalovaný špičkový výkon a systémové ztráty.


PERFORMANCE OF TRACKING PV

Solar radiation database*
PVGIS-CMSAF

PV technology*
Crystalline silicon

Installed peak PV power [kWp]*
1

System loss [%]*
14

Tracking mounting options

☐ Vertical axis
Slope [°]
(0-90)
☐ Optimize

☐ Inclined axis
Slope [°]
(0-90)
☐ Optimize

☐ Two-axis

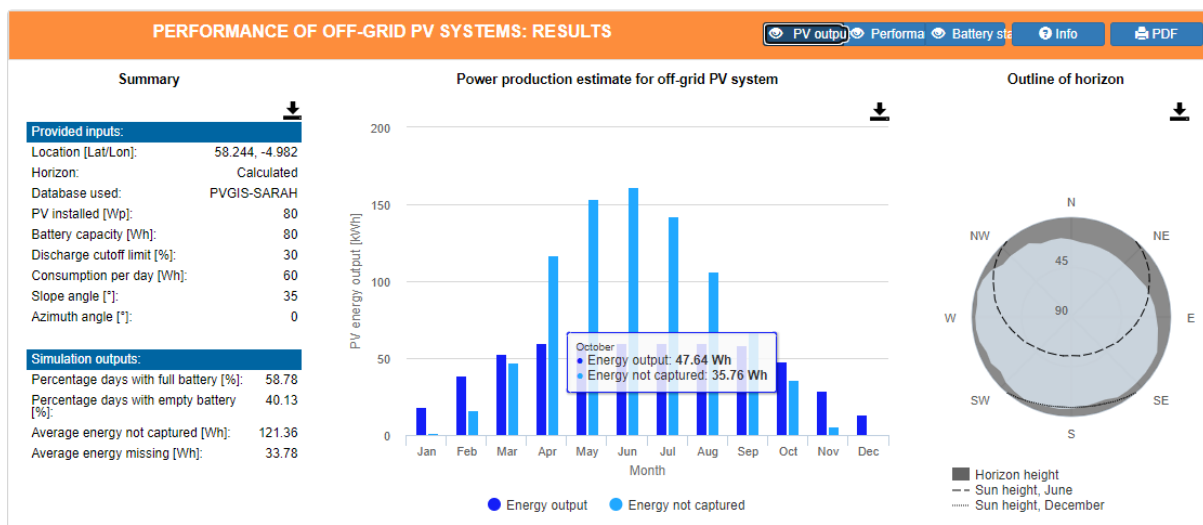
Obr. 10: Vstupní data pro výpočet tracking PV systému. [5]

Výstup tohoto výpočtu je obdobný jako u systému grid-connected. Graf se skládá z průměrných měsíčních hodnot vyrobené energie fotovoltaického systému během kalendářního roku. Jedinou změnou je to, že graf a výsledky jsou pro každý měsíc průměrný výkon pro všechny zvolené systémy natáčení.

3.1.3. Fotovoltaický systém „off-grid“

Tato část PV GIS vypočítává energii vyrobenou fotovoltaickým systémem, který není připojen k distribuční síti, ale vyrobenou energii uchovává v bateriích. Jedná se o tzv. ostrovní režim. Vstupními daty jsou opět databáze slunečního záření a instalovaný špičkový výkon. Dalším parametrem je kapacita baterie/í, mezní hodnota vybití baterie, která je nastavena na 40 procent, denní spotřeba elektrické energie lokální sítě připojené k bateriím. Do aplikace lze nahrát soubor s vlastními hodnotami spotřeby, který by se měl skládat z 24hodinových hodnot. Každá hodnota musí být na samostatném řádku a ve formátu zlomku denní spotřeby ke které dochází v každé hodině. Součet zlomků musí tedy být roven jedné. Poslední dva parametry jsou samozřejmě sklon a orientace.

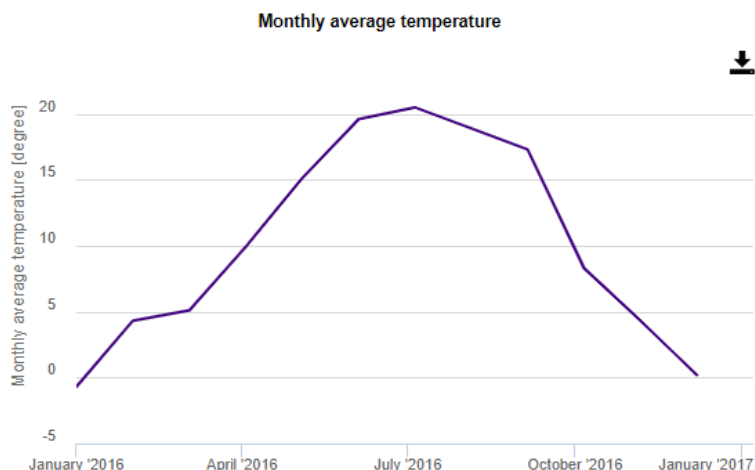
Stejně jako u ostatních nástrojů pro výpočet výkonu fotovoltaického systému, je výstup off-grid systému graf měsíčních hodnot energie systému. Na výběr jsou tři různé měsíční grafy. PV output graf zachycuje měsíční průměr odhadu výroby energie ze systému i s nezachycenou energií díky maximálně nabitým bateriím. Performance graf zachycuje jednotlivé měsíce a v procentech udávaný počet dní, kdy byla baterie nabitá či vybitá. Poslední graf Battery state je histogram stavu nabití baterie.



Obr. 11: Výstup nástroje pro výpočet off-grid systému. [5]

3.1.4. Průměrné měsíční údaje o slunečním záření

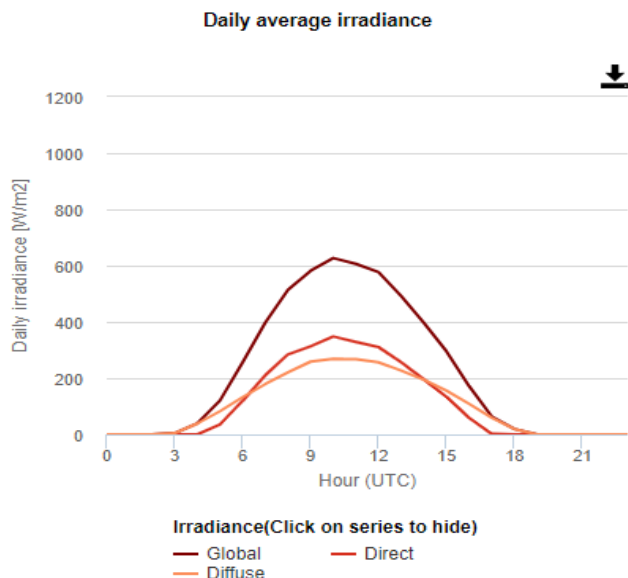
Pomocí tohoto nástroje lze získat údaje o měsíčních průměrech přímého slunečního záření, poměru mezi přímým a difúzním zářením a teploty pro zvolené místo. V grafech nebo tabulkách můžeme zobrazit, jak se průměrné měsíční záření mění v průběhu víceletého období. Dále nám PV GIS poskytuje graf poměru přímého a difúzního záření v průběhu roku. Třetí typ je graf průměrné teploty zvoleného místa. V databázi si lze u vstupních údajů vybrat od roku 2005 až do roku 2016.



Obr. 12: Průměrná měsíční teplota v roce 2016 pro zvolené místo. [5]

3.1.5. Průměrné denní údaje o slunečním záření

V této části PV GIS lze získat průměrné hodinové sluneční záření pro pevnou rovinu během dne pro vybraný měsíc, přičemž denní průměr je za všechny dny ve zvoleném měsíci. Záření se zobrazí jako globální, přímé a difúzní. Stejný časový graf lze získat i pro průměrnou teplotu. Třetí graf se opět jako u předešlého nástroje týká přímého, difúzního a globálního záření pro pohyblivé systémy naklánějící se ke slunci.



Obr. 13: Průměrné denní sluneční záření pro měsíc červen. [5]

3.1.6. Průměrné hodinové údaje o slunečním záření

Data o slunečním záření používaná v PV GIS se skládají z hodinových hodnot získaných za několik let. Tento nástroj umožňuje uživatelům přístup k úplnému obsahu databáze slunečního záření.

Kromě toho umí tento nástroj i vypočítat výkon fotovoltaického systému pro každou hodinu během zvoleného období. I v tomto případě se proto u vstupních dat znovu musí uvádět, zda se jedná o pevně namontovaný systém nebo systém pohybující se na určité ose. Další vstupní údaje jsou stejné jako ta, která se zadávají u nástroje pro výpočet výkonu fotovoltaického systému.

HOURLY RADIATION DATA

Solar radiation database* PVGIS-SARAH

Start year:* 2016 End year:* 2016

Mounting type:*

☒ Fixed ☐ Vertical axis ☐ Inclined axis ☐ Two axis

Slope [°] (0-90) ☐ Optimize slope

Azimuth [°] (-180-180) ☐ Optimize slope and azimuth

☐ PV power

PV technology Crystalline silicon

Installed peak PV power [kWp] 1

System loss [%] 14

☐ Radiation components

Obr. 14: Vstupní data pro výpočet hodinových hodnot. [5]

Na rozdíl od ostatních nástrojů PV GIS je pro hodinová data k dispozici pouze možnost stažení dat ve formátu csv. Je to způsobeno velkým množstvím dat, které by se nezládly zpracovat do grafu.

3.1.7. Typický meteorologický rok „TMY“

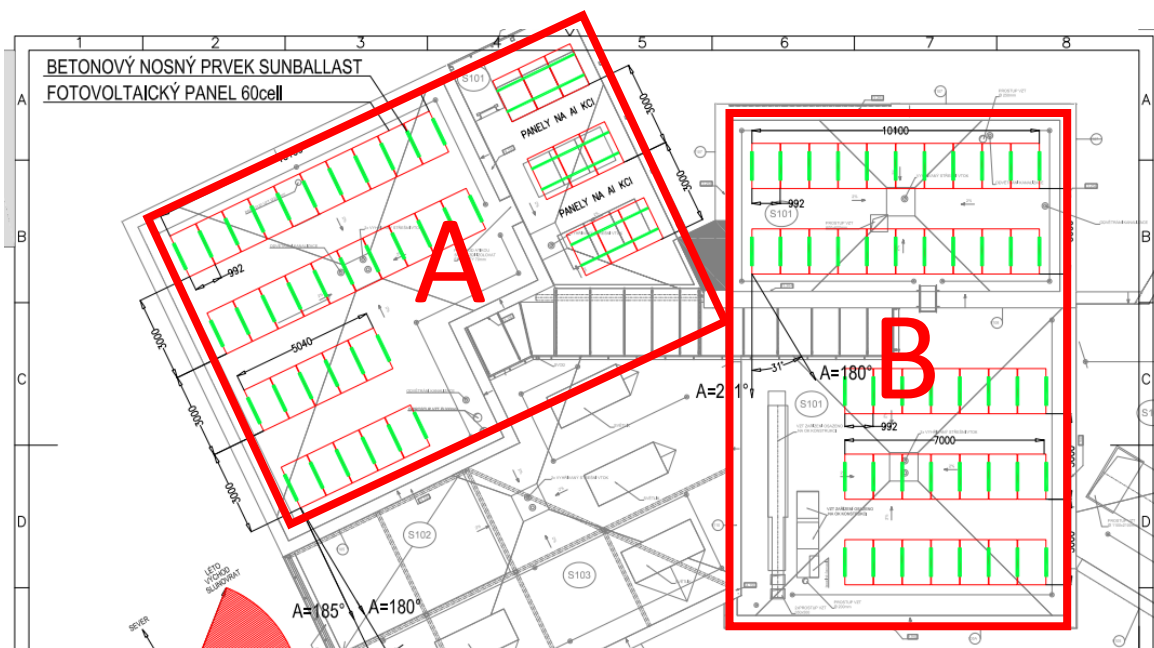
Nástroj TMY umožňuje uživateli stáhnout si soubor obsahující data typického meteorologického roku. Soubor obsahuje hodinová data následujících proměnných: globální, přímé a difúzní sluneční záření, tlak vzduchu, teplotu, rychlost větru, směr větru, relativní vlhkost a dlouhovlnné infračervené záření. U každého řádku s těmito hodnotami je uveden také datum a čas. Soubor dat byl vytvořen pro každý měsíc, který byl nejtypičtější z desetileté řady. Na vstupní kartě se jednoduše zvolí časové desetileté období. V současnosti jsou na výběr tři možnosti. Výsledek lze stáhnout opět ve formátu csv nebo epw.

4. Předpoklad výroby FVE v aplikaci PV GIS

Pro předpoklad výroby v aplikaci PV GIS jsem rozdělil FV systém na dvě sekce, protože každá sekce má jiný azimut. Aplikace PV GIS dokáže počítat pouze s jedním azimutem a sklonem panelů. Sekce A zahrnuje 39 panelů o výkonu 12 090 Wp. V sekci B je 41 panelů o výkonu 12 710 Wp. Hodnotu systémových ztrát jsem ponechal defaultně nastavenou na 14 %. Parametry FVE jsou v následující tabulce.

Tabulka 1: Specifikace FV elektrárny na budově CPIT III.

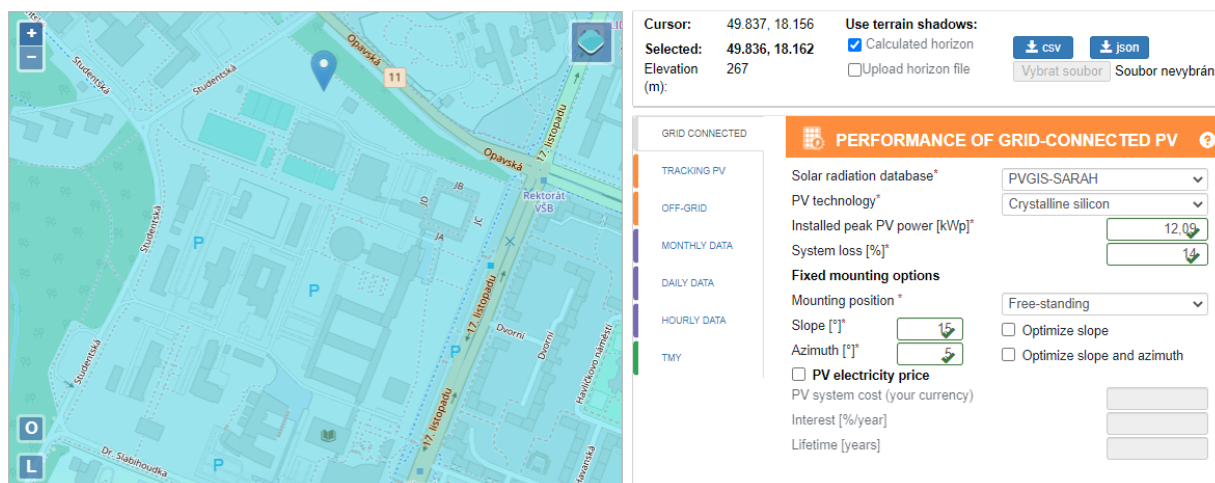
Souřadnice	49.836, 18.162
Nadmořská výška	267 m. n. m.
Výkon jednoho FV panelu	310 Wp
Počet FV panelů	80 ks
Typ panelů	Axitec AC-310M/156-60S,
Technologie panelů	Monokrystalický
Sklon panelů	15°
Azimut (orientace) panelů	185°(J) a 211°(JJZ)
Ztráty systému	14 %



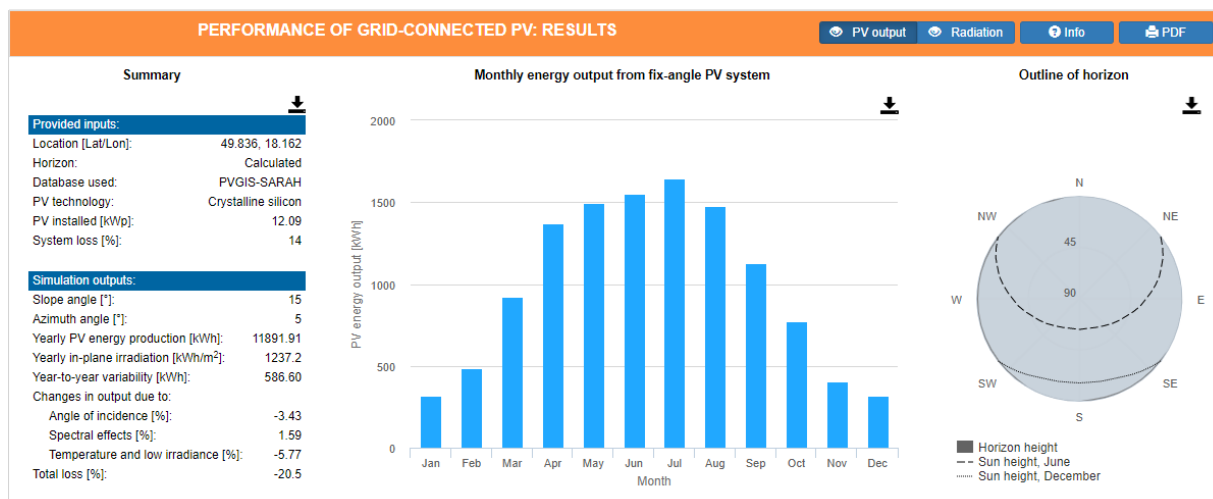
Obr. 15: Rozložení panelů FVE na budově CPIT III. [6]

Předpoklad výroby pro FVE spočítám pro tři možné databáze, které jsou dostupné pro Evropu, a to PV GIS – SARAH, PV GIS-COSMO a PV GIS-ERA5. Ve výpočtech budu uvažovat i okolní horizont. Pro každou databázi nejprve namodeluji zvlášť výrobu sekcí A a B a poté hodnoty sečtu a zachytím do jednoho grafu.

4.1. Předpoklad výroby FVE s databází PV GIS-SARAH



Obr. 16: Vstupní data pro výpočet sekce A. [5]



Obr. 17: Výsledek výpočtu sekce A s databází PV GIS-SARAH. [5]

Tabulka 2: Měsíční hodnoty vyrobené energie sekce A podle databáze PV GIS-SARAH.

měsíc	energie (kWh)
Leden	320,53
Únor	487,52
Březen	921,17
Duben	1369,42
Květen	1497,11
Červen	1553,78
Červenec	1644,28
Srpen	1475,37
Září	1126,21
Říjen	771,1
Listopad	407,37
Prosinec	318,04

Cursor: 49.835, 18.155
 Selected: 49.836, 18.162
 Elevation: 267

Use terrain shadows:
☒ Calculated horizon
☐ Upload horizon file

Download CSV | Download JSON | Vybrat soubor | Soubor nevybrán

GRID CONNECTED

TRACKING PV
 OFF-GRID
 MONTHLY DATA
 DAILY DATA
 HOURLY DATA
 TMY

PERFORMANCE OF GRID-CONNECTED PV

Solar radiation database*
 PVGIS-SARAH

PV technology*
 Crystalline silicon

Installed peak PV power [kWp]*
 12.71

System loss [%]*
 14

Fixed mounting options

Mounting position*
 Free-standing

Slope [°]*
 15

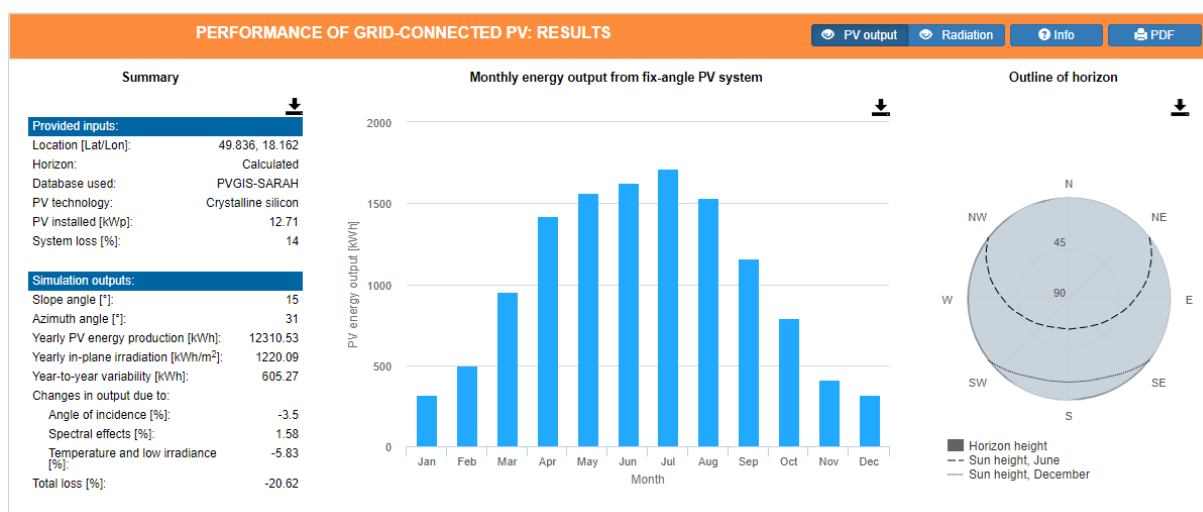
Azimuth [°]*
 3

☐ Optimize slope
☐ Optimize slope and azimuth

☐ PV electricity price

PV system cost (your currency)
 Interest [%/year]
 Lifetime [years]

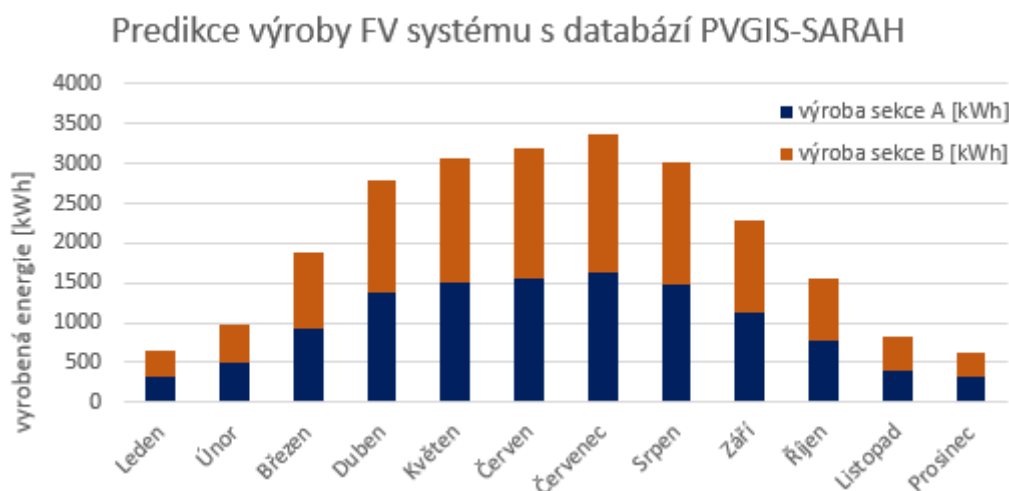
Obr. 18: Vstupní data pro výpočet sekce B. [5]



Obr. 19: Výsledek výpočtu sekce B s databází PV GIS-SARAH. [5]

Tabulka 3: Měsíční hodnoty vyrobené energie sekce B podle databáze PV GIS-SARAH.

měsíc	energie (kWh)
Leden	320,46
Únor	498,43
Březen	950,36
Duben	1421,01
Květen	1563,45
Červen	1628,98
Červenec	1716,25
Srpen	1531,43
Září	1161,99
Říjen	788,61
Listopad	412,37
Prosinec	317,19



Obr. 20: Graf vyrobené elektrické energie fotovoltaického systému s databází PV GIS-SARAH.

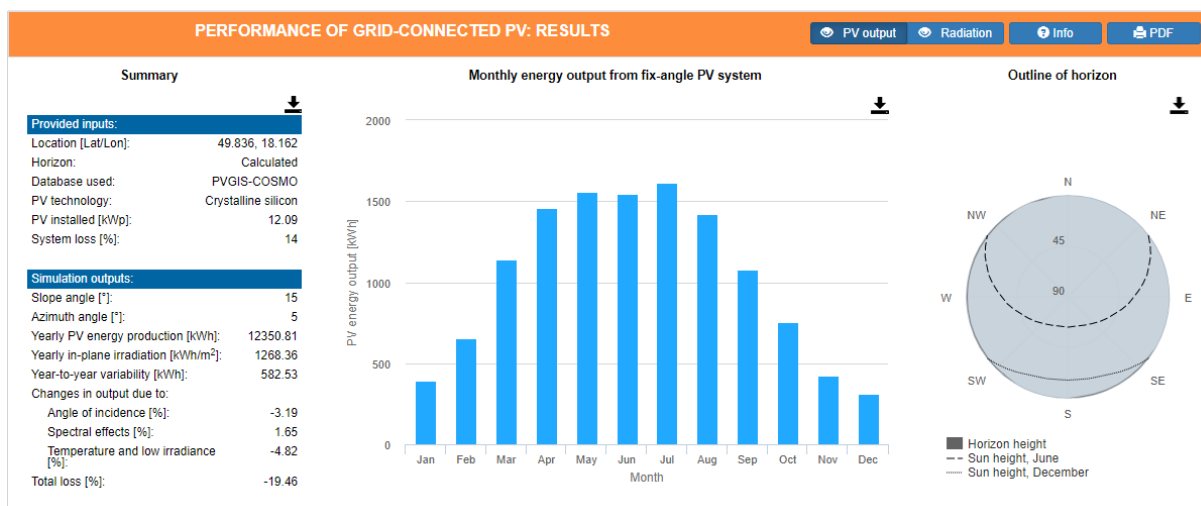
Tabulka 4: Měsíční hodnoty vyrobené energie celé FV elektrárny podle databáze PV GIS-SARAH.

měsíc	energie (kWh)
Leden	640,99
Únor	985,95
Březen	1871,53
Duben	2790,43
Květen	3060,56
Červen	3182,76
Červenec	3360,53
Srpen	3006,8
Září	2288,2
Říjen	1559,71
Listopad	819,74
Prosinec	635,23

Celkovou vyrobenou energii fotovoltaické elektrárny z databáze PV GIS-SARAH jsem získal součtem měsíčních výkonů sekcí A a B, které vypočítal PV GIS. Celková vyrobená energie za celý rok je 24 202 kWh. FV systém na budově je hybridní. Hodnotu energie v PV GIS jsem počítal v nástroji grid-connected, protože nástroj výpočtu pro hybridní systém v PV GIS není. V úvahu by připadal ještě nástroj off-grid, ovšem tam je potřeba mít hodnotu denní spotřeby celého systému připojeného k FV a limit minimálního vybití baterie. Pokud bych měl k dispozici tyto 2 údaje, dal by se vytěžit z výpočtu ještě graf průměrného měsíčního stavu vybití/nabití baterie a histogram stavu nabití.

4.2. Předpoklad výroby FVE s databází PV GIS-COSMO

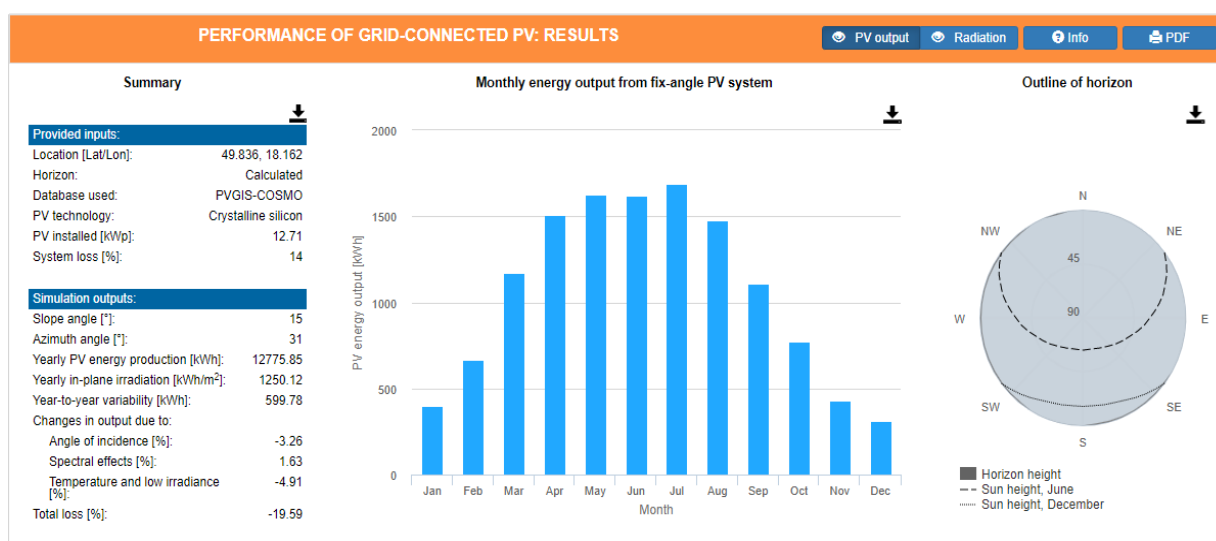
Vstupní údaje jsou shodné s předchozím výpočtem kromě databáze slunečního záření. Pro tento výpočet jsem zvolil databázi PV GIS-COSMO. Postup modelování bude shodný jako u PV GIS SARAH, nejprve tedy namodeluji zvlášť výrobu sekcí A a B a poté hodnoty sečtu a zachyťm do jednoho grafu.



Obr. 21: Výsledky výpočtu sekce A s databázi PV GIS-COSMO. [5]

Tabulka 5: Měsíční hodnoty vyrobené energie sekce A podle databáze PV GIS-COSMO.

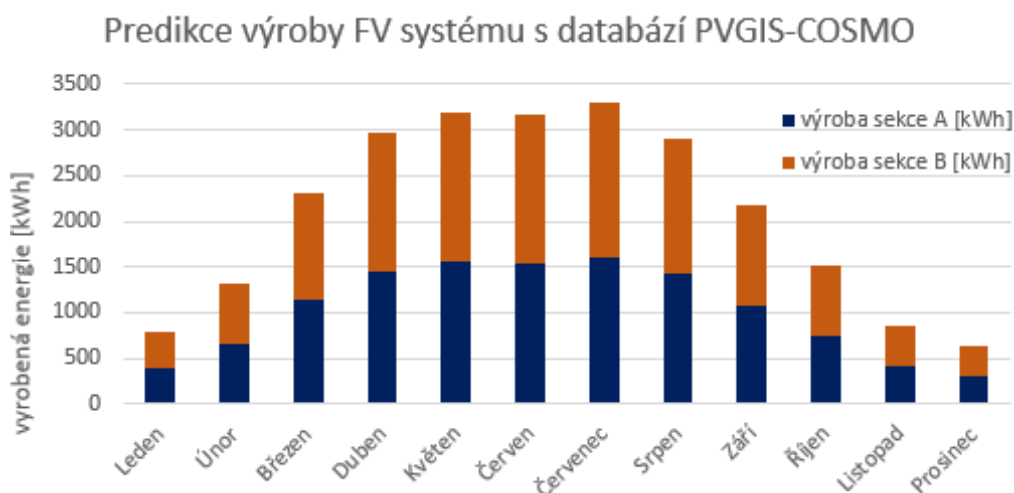
měsíc	energie (kWh)
Leden	392,43
Únor	655,2
Březen	1140,64
Duben	1456,18
Květen	1560,11
Červen	1542,88
Červenec	1614,42
Srpen	1423,18
Září	1075,79
Říjen	754,8
Listopad	423,66
Prosinec	311,52



Obr. 22: Výsledek výpočtu sekce B s databází PV GIS-COSMO. [5]

Tabulka 6: Měsíční hodnoty vyrobené energie sekce B podle databáze PV GIS-COSMO.

měsíc	energie (kWh)
Leden	397,02
Únor	669,35
Březen	1169,07
Duben	1506,1
Květen	1628,52
Červen	1618,35
Červenec	1687,22
Srpen	1479,67
Září	1109,59
Říjen	770,11
Listopad	428,04
Prosinec	312,82



Obr. 23: Graf vyrobené elektrické energie fotovoltaického systému s databází PV GIS-COSMO.

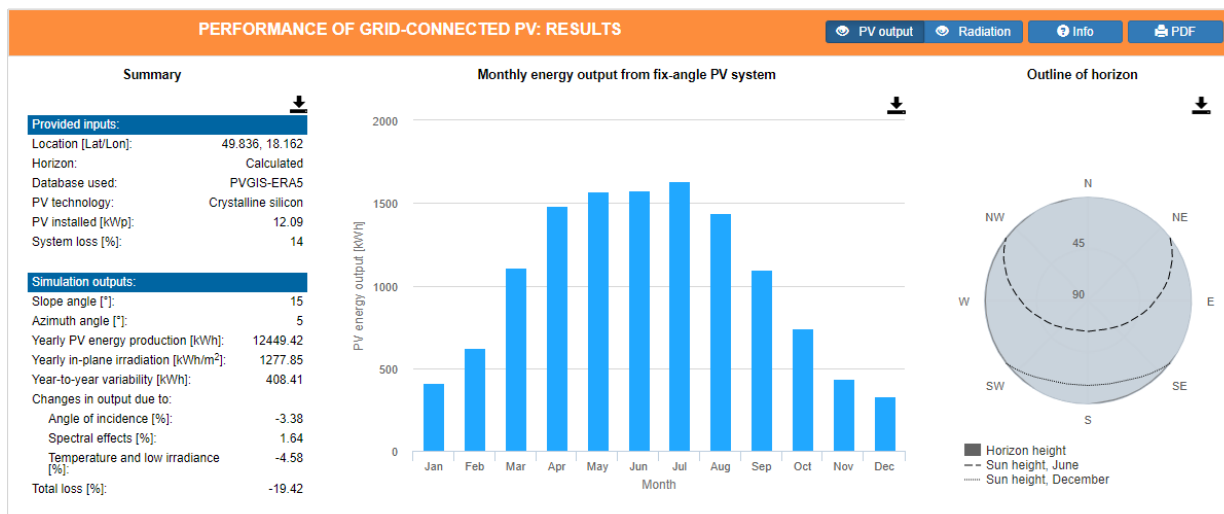
Tabulka 7: Měsíční hodnoty vyrobené energie celé FV elektrárny podle databáze PV GIS-COSMO.

měsíc	energie (kWh)
Leden	789,45
Únor	1324,55
Březen	2309,71
Duben	2962,28
Květen	3188,63
Červen	3161,23
Červenec	3301,64
Srpen	2902,85
Září	2185,38
Říjen	1524,91
Listopad	851,7
Prosinec	624,34

Celková vyrobená energie FVE za celý rok je 25 126, 67 kWh.

4.3. Předpoklad výroby FVE s databází PV GIS-ERA5

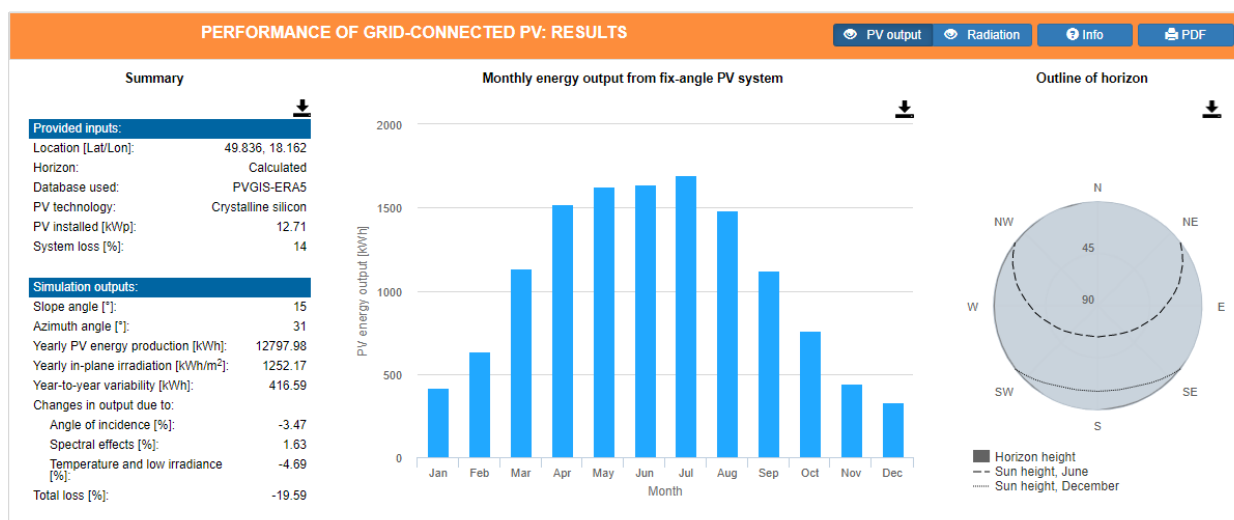
Vstupní údaje jsou shodné s prvním výpočtem kromě databáze slunečního záření. Pro tento výpočet jsem zvolil databázi PV GIS-ERA5.



Obr. 24: Výsledky výpočtu sekce A s databází PV GIS-ERA5. [5]

Tabulka 8: Měsíční hodnoty vyrobené energie sekce A podle databáze PV GIS-ERA5.

měsíc	energie (kWh)
Leden	411,83
Únor	622,75
Březen	1109,47
Duben	1480,03
Květen	1567,38
Červen	1573,77
Červenec	1632,86
Srpen	1440
Září	1097,66
Říjen	744,15
Listopad	438,79
Prosinec	330,73

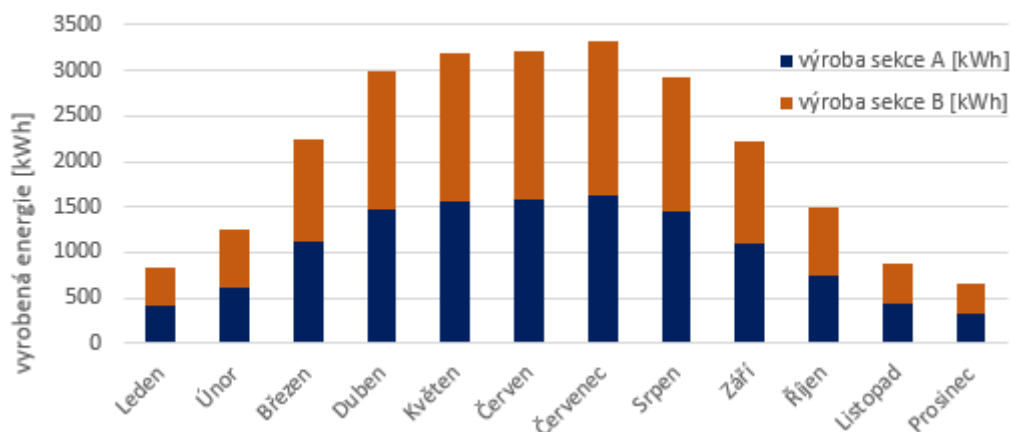


Obr. 25: Výsledky výpočtu sekce B s databází PV GIS-ERA5. [5]

Tabulka 9: Měsíční hodnoty vyrobené energie sekce B podle databáze PV GIS-ERA5.

měsíc	energie (kWh)
Leden	414,47
Únor	633,51
Březen	1133,25
Duben	1521,27
Květen	1627,15
Červen	1636,97
Červenec	1694,61
Srpen	1485,55
Září	1123,93
Říjen	757,3
Listopad	442
Prosinec	328,17

Predikce výroby FV systému s databází PVGIS-ERA5



Obr. 26: Graf vyrobené elektrické energie fotovoltaického systému s databází PV GIS-ERA5.

Tabulka 10: Měsíční hodnoty vyrobené energie celé FV elektrárny podle databáze PV GIS-ERA5.

měsíc	energie (kWh)
Leden	826,3
Únor	1256,26
Březen	2242,72
Duben	3001,3
Květen	3194,53
Červen	3210,74
Červenec	3327,47
Srpen	2925,55
Září	2221,59
Říjen	1501,45
Listopad	880,79
Prosinec	658,9

Celková vyrobená energie FVE za celý rok je 25247, 6 kWh.

4.4. Zhodnocení výsledků vybraných databází

Pro předpoklad výroby z FV elektrárny na nové budově CPIT III v areálu VŠB – TU Ostrava jsem zvolil v aplikaci PV GIS tři dostupné databáze slunečního záření. PV GIS-SARAH, PV GIS-COSMO a PV GIS-ERA5. Ostatní dostupné databáze nejsou vhodné, protože PV GIS-NSRDB se používá pro výpočty na americkém kontinentu a PV GIS-CSMAF je zastaralá databáze zahrnující roky 2007-2016, kterou nahradily novější databáze.

Nejvyšší hodnotu vyrobené roční energie předpokládá databáze PV GIS-ERA5, a to 25247,6 kWh. Druhá nejvyšší hodnota je jen nepatrně nižší – 25126,67 kWh. Tato hodnota je předpokládána databází PV GIS-COSMO. Nejmenší roční hodnotu vyrobené energie FV elektrárny 24 202 kWh předpokládá databáze PV GIS-SARAH.

Tabulka 11: Srovnání vyrobené roční energie.

<i>databáze</i>	<i>energie (kWh)</i>
SARAH	24 202
COSMO	25 126,67
ERA5	25 247,6

Graf měsíční vyrobené energie kopíruje graf měsíčních hodnot slunečního záření. Nejvyšší hodnota slunečního záření ve všech databázích je v místě stavby FV elektrárny v červenci. Tomu odpovídá nejvyšší hodnota vyrobené energie, která je také v červenci. Tento trend se vyskytuje u všech tří zvolených databází. Všechny databáze se také shodují, že nejproduktivnější měsíce dále budou červen a květen. V dalším kroku se už ale předpoklady rozcházejí. Databáze SARAH považuje za čtvrtý nejproduktivnější měsíc srpen, zatímco u dalších dvou databází je to duben. Z pohledu nejnižší hodnoty je u všech databází měsíc s nejmenší vyrobenou energií prosinec. Ovšem u databáze SARAH je hodnota energie za leden jen lehce větší, zatímco u COSMO a ERA5 je lednová hodnota větší o přibližně 25 % než v prosinci.

Tabulka 12: Srovnání dvou nejméně produktivních měsíců.

<i>databáze</i>	<i>měsíc</i>	<i>energie (kWh)</i>
SARAH	prosinec	635,23
	leden	640,99
COSMO	prosinec	624,34
	leden	789,45
ERA5	prosinec	658,9
	leden	826,3

Obecně pak lze říct, že FV elektrárna produkuje méně energie v podzimních měsících než na jaře, i když jsou srovnatelné teploty, protože na jaře přímé záření převažuje nad difúzním. Důležitým faktorem je také délka svitu. Dny na jaře jsou delší než na podzim. To jsou také měsíce, kde se databáze nejvíce rozcházejí. Ovšem v tabulce 13 lze vidět, že databáze SARAH předpokládá produkci v září větší o 22 % než v březnu. Zatímco databáze COSMO a ERA5 vidí větší produkci v březnu než v září.

Tabulka 13: Srovnání výroby v měsíci březnu a září.

<i>databáze</i>	<i>měsíc</i>	<i>energie (kWh)</i>
SARAH	březen	1871,53
	září	2288,2
COSMO	březen	2309,71
	září	2185,38
ERA5	březen	2242,72
	září	2221,59

Z tabulek výsledných hodnot každé databáze lze také vysledovat fakt, že nejvyšší průměrnou měsíční hodnotu předpokládá PV GIS-SARAH v červenci. COSMO a ERA5 nemají tak špičkové hodnoty v letních měsících, ale mají větší vyrovnanost produkce po celý rok. Tato vyrovnanost celoroční produkce má za následek, že ve výsledku je celkový roční výkon větší u databází COSMO a ERA5 než u SARAH, která má nejvyšší produkci během tří letních měsíců.

Tabulka 14: Měsíce s nejvyšší produkcí od každé databáze.

<i>databáze</i>	<i>měsíc</i>	<i>energie (kWh)</i>
SARAH	červenec	3 360,53
COSMO	červenec	3301,64
ERA5	červenec	3 327,47

Všechny databáze předpokládají, že sekce B vyrobí více energie než sekce A. To je dáno tím, že se databáze se tolik neliší. V sekci B je totiž o dva panely více, a tedy instalovaný výkon je o 620 Wp větší.

Tabulka 15: Srovnání výroby obou částí elektrárny u všech databází.

<i>databáze</i>	<i>sekce</i>	<i>energie (kWh)</i>
SARAH	A	11891,9
	B	12310,53
COSMO	A	12350,81
	B	12775,86
ERA5	A	12449,42
	B	12798,18

Podle podrobnější analýzy a výše zmíněných poznatků z výsledků predikce výroby energie z FV elektrárny bych pro nejpřesnější výpočet předpovědi výkonu použil databázi SARAH. Zbývající databáze COSMO a ERA5 vykazovaly více odchýlené hodnoty oproti databázi SARAH. Databáze ERA5 se spíše více hodí pro severní části Evropy nad 60° severní šířky. Databáze COSMO je alternativa pro ERA5 vytvořena reanalýzou. Naměřená data reálné spotřeby budu tedy porovnávat s výsledky dle databáze PV GIS-SARAH

5. Skutečná výroba elektrické energie FVE

Pro vyhodnocení reálné vyrobené elektrické energie mám k dispozici data z kontinuálního měření od 19. října do 31. března. Data o výrobě jsou ve formátu desetiminutových intervalů. Ke každému intervalu je přiřazena hodnota výkonu, který FVE za tento úsek vyprodukovala. Pro porovnání s předpokládanou výrobou z PV GIS jsem desetiminutové hodnoty výkonu převedl na energii s jednotkou watthodiny podle následujícího vzorce.

$$E_{(Wh)} = P_{(W)} * t_{(h)} \quad (1)$$

Příklad přepočtu:

Tabulka 16: Tabulka pro příklad přepočtu.

Desetiminutový interval (h/6)	Výkon(W)	Energie (Wh)
01.11.2020 9:20	303	50,5

$$E_{(Wh)} = P_{(W)} * t_{(h)} = 303 * \frac{1}{6} = 50,5 \text{ Wh}$$

Ovšem ani po převodu vyrobeného výkonu FVE nelze jednoznačně tuto vyrobenou energii srovnávat s namodelovanými výsledky. Zařízení elektrárny nedovoluje přetoky elektrické energie do distribuční sítě, a proto při plně nabitě baterii jsou MPPT regulátory nastaveny mimo svůj pracovní bod.

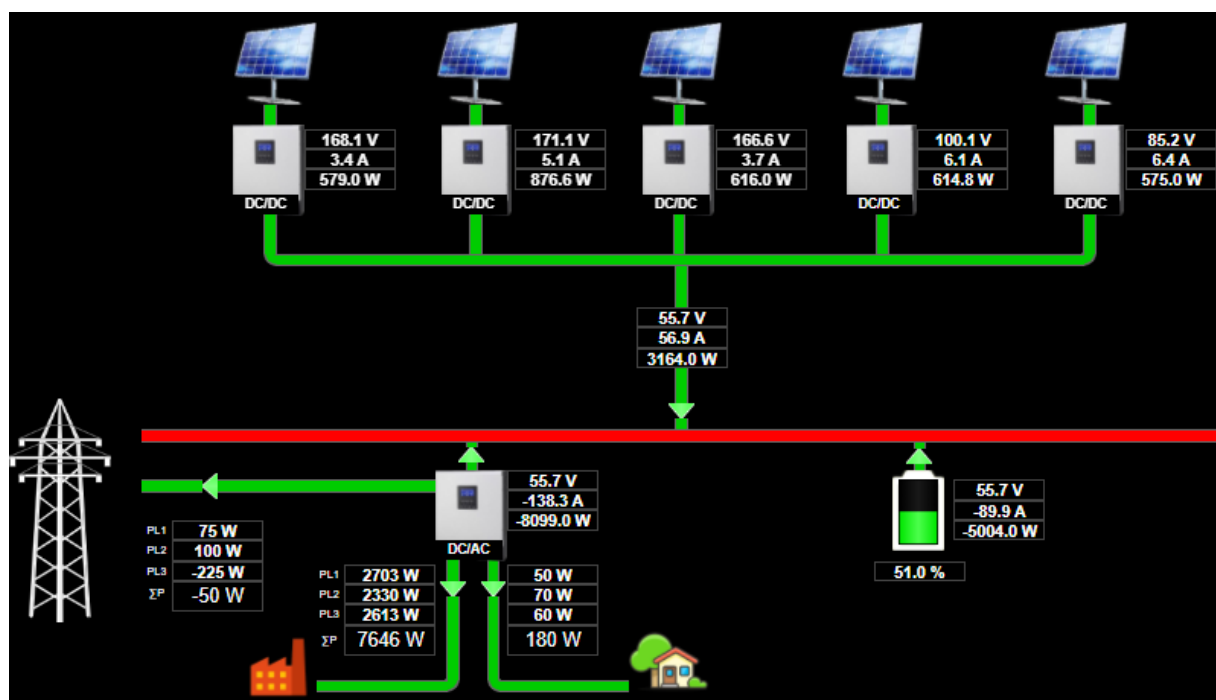


Obr. 27: Detailní foto FV panelů.

Dalším důvodem k neúplně relevantnímu srovnání je zastínění sněhovou pokrývkou. Podle mého mínění byly panely některé dny zastíněny sněhovou pokrývkou, které přispívalo i to, že nemají moc příkrý sklon směrem k zemi (15°) a pata panelu je nízko nad vodorovnou plochou střechy budovy, jak je patrné z obrázku 27. Pokud je plocha panelů zastíněná sněhovou pokrývkou, klesá jejich výkon k nule. Moderní panely sice mají hladký povrch, který napomáhá ke sjíždění sněhu z aktivní plochy, ale letošní zima, hlavně v lednu a únoru, byla teplotně podprůměrná a nadprůměrná co se týče výšky sněhové pokrývky. Proto se domnívám, že panely zůstávaly zakryty sněhem. V lednu i v únoru lze vidět z grafu měsíční výroby, že bylo období několika dní, kde je výroba téměř nulová. Podle historických dat ČHMÚ tyto dny korespondují s velkou sněhovou pokrývkou, teplotou hluboko pod bodem mrazu a

oblačnou oblohou. Tyto podmínky napomáhaly k udržení sněhové pokrývky na ploše panelů. Částečné zastínění lze vidět i z ptáčích perspektivy na obrázku 2. Výška krajní zídky na střeše je poté patrná na obrázku 27. Zde je toto zastínění způsobeno samotnou konstrukcí budovy, hlavně v pozdějších odpoledních hodinách, kdy je slunce již nízko nad obzorem. V aplikaci PV GIS lze nastavit okolní horizont kvůli stínění okolních kopců, či budov. Toto stínění sněhovou pokrývkou a vlastní konstrukcí budovy je ale specifické, těžké k nasimulování a PV GIS s těmito vlivy nepočítá.

Na obrázku 28 je zobrazena dispozice monitoringu FVE. Naměřené desetiminutové hodnoty výkonu jsou zaznamenávány u jednotlivých MPPT solárních regulátorů. Dále je zde patrné, že výroba je omezoována, pokud je baterie plně nabitá a zároveň je spotřeba menší než výroba. V čase, kdy jsem tento obrázek zaznamenal, byla baterie nabitá na 51 %. To znamená, že v nedávné době byla spotřeba elektrické energie větší než výroba z fotovoltaických panelů. Rozdíl mezi spotřebou a výrobou byl hrazen právě z plně nabitých baterií. Stav, kdy je z baterie čerpána energie k pokrytí spotřeby CPIT, je patrný i ze znaménka mínus před hodnotou výkonu v tabulce u baterie a interaktivní šipky, která se mění podle směru toků výkonu. Při nedostatečném nabití baterie a menší výrobě z fotovoltaických panelů, než je spotřeba, je výkon získáván i z lokální distribuční sítě. Rozvody mezi MPPT solárními regulátory, baterií a hybridním nabíječem/měničem jsou stejnosměrné. Hybridní nabíječ/měnič pracuje ve stavu AC/DC nebo DC/AC podle toho, zda se nabíjí baterie, nebo zda je baterie zdrojem pro spotřebu. V případě měniče je stejnosměrný výkon ze solárních panelů přes MPPT regulátory a výkon baterie rozstřídán, aby mohly být napájeny zálohované rozvody tzv. kritická zátěž zapojené za rozvaděčem ASO4_3F (obrázek domečku), tak i nezálohované rozvody před ASO4_3F (obrázek továrny). V případě napáječe je střídavý výkon odebírán z lokální distribuční soustavy a usměrněn hybridním napáječem, aby se přes stejnosměrný rozvod dobila baterie nad limit, který bude dostačující pro následný ostrovní provoz. Z obrázku lze zjistit, že část výkonu je vytlačena do lokální distribuční soustavy. Jedná se pouze o minimální přetoky v rámci regulačního procesu, které jsou kontrolovány měřicí třífázovou sondou MTP měřící v každé fázi. VŠB – TU Ostrava má podobné interaktivní monitoringy u více podobných výroben v areálu.



Obr. 28: Dispozice monitoringu FVE. [9]

5.1. Porovnání modelové výroby jednotlivých měsíců s naměřenými hodnotami

Jak již bylo zmíněno výše, modelovou výrobu elektrické energie z aplikace PV GIS nelze relevantně porovnat s naměřenými hodnotami. Hlavním důvodem je hybridní systém FVE, který omezuje výrobu při plném nabití systému baterií. Dalším důvodem je zastínění části panelů konstrukcí budovy a možnost zastínění sněhovou pokrývkou během zimních měsíců. Při analýze dat jsem zjistil, že chybí hodnoty z monitoringu od 23. do 28. prosince, tudíž výroba za měsíc prosinec není kompletní.

Místo nástroje off-grid pro simulaci výroby jsem použil nástroj grid-connected, protože jsem neměl k dispozici údaje o spotřebě celého objektu CPIT III, kterou potřebuji znát jako vstupní údaj k výpočtu off-grid systému. Tato omezení jsem vzal na vědomí, a proto budu modelovou výrobu s naměřenými hodnotami srovnávat následujícím způsobem. Modelová data měsíční výroby, které jsem nasimuloval v PV GIS jsou maximální potenciální výroba fotovoltaického systému, kterou je elektrárna schopna vyrobit za měsíc. Naměřené hodnoty shrnu do měsíční výroby a vyhodnotím na kolik procent svého potenciálu se FVE dostala. Z ekonomického hlediska je nejlepší, pokud by FVE naplnila každý měsíc svůj potenciál maximální výroby. Naměřená data z měsíců, které mám k dispozici jsou ovlivněna také tím, že budova v září začala teprve svůj provizorní provoz a všechny technologie byly integrovány až koncem roku. Spotřeba elektřiny teda nebyla taková, aby se naplnil potenciál FVE i s ohledem na celosvětovou pandemii, kdy probíhala pouze on-line výuka. Spotřebiče s velkým příkonem, které se nachází v budově zatím nebyly využívány k výuce, projektům a výzkumům univerzity tak, jak se čekalo při projektování fotovoltaického systému. Ovšem i v částečném provozu má budova nezanedbatelnou spotřebu, kterou pokrývá právě energie slunce transformována fotovoltaickým systémem na elektrickou energii.

Tabulka 17: Hodnoty vyrobené energie.

Měsíc	Reálná výroba (kWh)	PV GIS SARA H (kWh)	PV GIS COSMO (kWh)	PV GIS ERA5 (kWh)
Leden	224,08	640,99	789,45	826,3
Únor	508,76	985,95	1324,55	1256,26
Březen	1644,9	1871,53	2309,7	2242,2
Říjen*	349,15	1559,71	1524,91	1501,45
Listopad	488,52	819,74	851,7	880,79
Prosinec	266,65	635,23	624,34	658,9

*pozn. Za měsíc říjen mám k dispozici data jen od 19. do 31.10.

V tabulce 17 je srovnání reálné měsíční výroby s modelovými výstupy z PV GIS. Srovnání je možné se všemi databázemi dat, pro které jsem výrobu dané FVE simuloval. Pro srovnání výroby v jednotlivých měsících využiji modelovou výrobu, která byla předpovězena s databází PV GIS SARA H.

5.1.1. Výroba za měsíc listopad

Za měsíc listopad byla celková výroba elektrické energie 488,52 kWh. PV GIS předpověděl díky datové řadě SARA H hodnotu 819,74 kWh. FVE se dostala na 59,6 % svého potenciálu, který by mohla naplnit, pokud by výroba nebyla omezována. V listopadu se již dny krátí, a proto elektrárna nedokáže vyrobit tolik energie jako v předešlých měsících. Dalším důvodem je slunce, které se v pokročilém podzimu a v zimě nedostává vysoko nad horizont. Začíná také převládat spíše difúzní sluneční záření než přímé díky přibývajícím oblačnostem.



Obr. 29: Graf desetiminutových hodnot vyrobené energie za měsíc listopad.

Z obrázku 29 je patrné, že nejvyšší desetiminutová hodnota vyrobené energie za měsíc listopad byla 6.11., kdy FVE vyrobila 1610,22 Wh. V tento den byla i nejvyšší denní vyrobená energie, a to 39,6 kWh. Podle dat Českého hydrometeorologického ústavu bylo v tento den skoro jasno s teplotami mezi 8 až 12 stupni, tudíž panely nebyly abnormálně zahřívány a zároveň dopadalo na panely přímé sluneční záření, kterému nestínilo množství mraků.

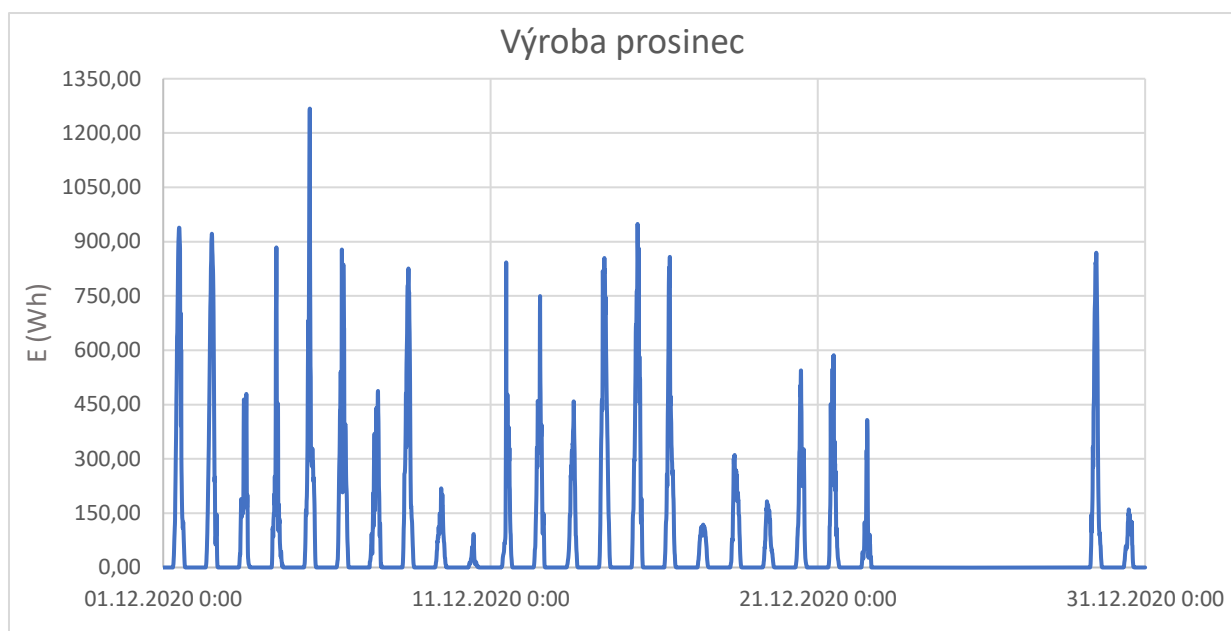
Tabulka 18: Výroba částí elektrárny měřena přes jednotlivé MPPT regulátory za listopad.

Regulátor	Energie (kWh)
MPPT 1	89,82
MPPT 2	112,3
MPPT 3	102,4
MPPT 4	98,7
MPPT 5	85,3
Celkem	488,52

Z tabulky 18 lze spatřit, jak je celková měsíční výroba rozložena na jednotlivé MPPT regulátory. Část FVE, která je připojena k MPPT 2, vyrobila za listopad nejvíc energie, a to 112,3 kWh. Nejmenší hodnotu vyrobené energie má část FVE5, kde je připojen MPPT 5, přes který šlo 85,3 kWh energie.

5.1.2. Výroba za měsíc prosinec

V prosinci vyrobila FVE celkem 266,65 kWh energie. Celková hodnota vyrobené energie ovšem byla nejspíš o pár desítek kilowatthodin vyšší, protože mi chybí data od 23. do 28. prosince. S částečnou nepřesností, kdy nejsou k dispozici data 1/6 měsíce, lze říct, že FVE dosáhla pouze na 42 % svého výrobního potenciálu. Aplikace PV GIS totiž předpověděla, že za prosinec může tato FVE vyprodukovat až 635,23 kWh. Databáze SARAH označila prosinec za nejméně produktivní měsíc, protože v prosinci nastávají nejkratší dny z celého roku. Podle naměřených dat bylo nejméně energie vyrobeno v lednu, protože byl tento měsíc ovlivněn zastíněním sněhovou pokrývkou.



Obr. 30: Graf desetiminutových hodnot vyrobené energie za měsíc prosinec.

Podle obrázku 30 si lze povšimnout, že vrcholová desetiminutová hodnota vyrobené energie za měsíc prosinec 1267,55 kWh byla 5.12. V tomto dni FVE vyrobila 17,6 kWh energie, což byla i nejvyšší denní výroba za prosinec. Podle dat ČHMÚ bylo v tento den polojasno s teplotou mezi 10 až 14 stupni. Mraky tak částečně tlumily přímé sluneční záření, ovšem na panely dopadalo i rozptýlené (difúzní) záření, které dokážou tyto typy panelů dobře zachycovat. Přímého slunečního záření, které má lepší intenzitu záření, bylo ale stále více než difúzního.

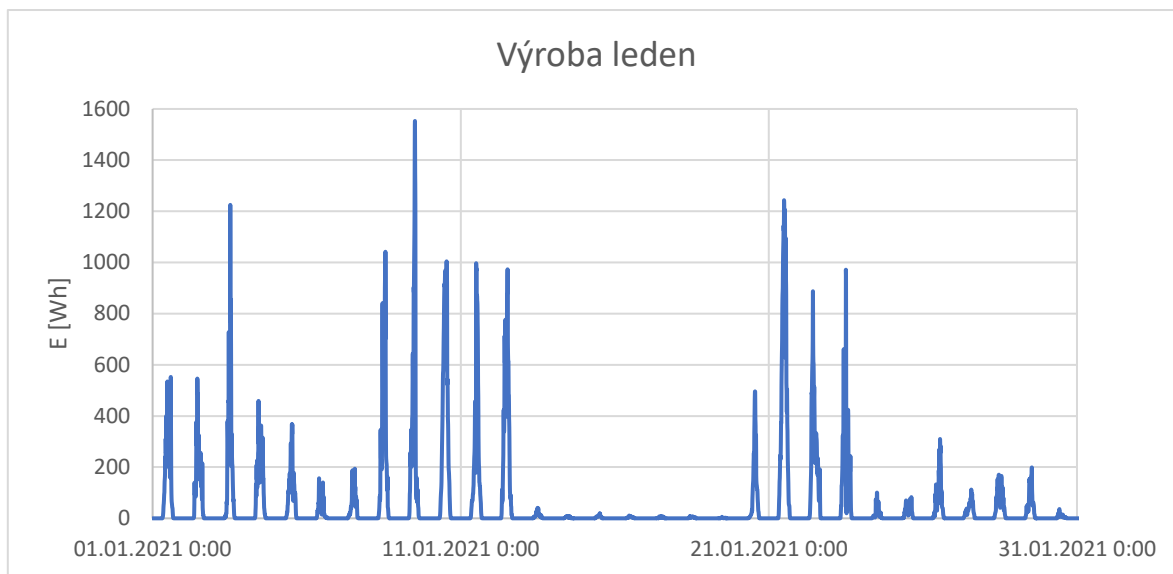
Tabulka 19: Výroba částí elektrárny měřena přes jednotlivé MPPT regulátory za prosinec.

Regulátor	Energie (kWh)
MPPT 1	44,4
MPPT 2	63,43
MPPT 3	58,8
MPPT 4	53,04
MPPT 5	46,98
Celkem	266,65

V tabulce 19 je souhrn výroby jednotlivých částí FVE. Nejvíce energie vyprodukovala část 2, ke které je připojen MPPT 2, přesněji 63,43 kWh. Nejméně energie za měsíc prosinec vyprodukovala část FVE 1 s MPPT regulátorem 5, a to 44,4 kWh. Pro srovnání mohu zmínit, že nejvyšší hodnota jednotlivého MPPT za prosinec, kterou má na svědomí část FVE 2, je stále o 22 kWh menší než u nejméně produktivní části FVE v prosinci. Celková výroba v prosinci je pak skoro poloviční oproti listopadu.

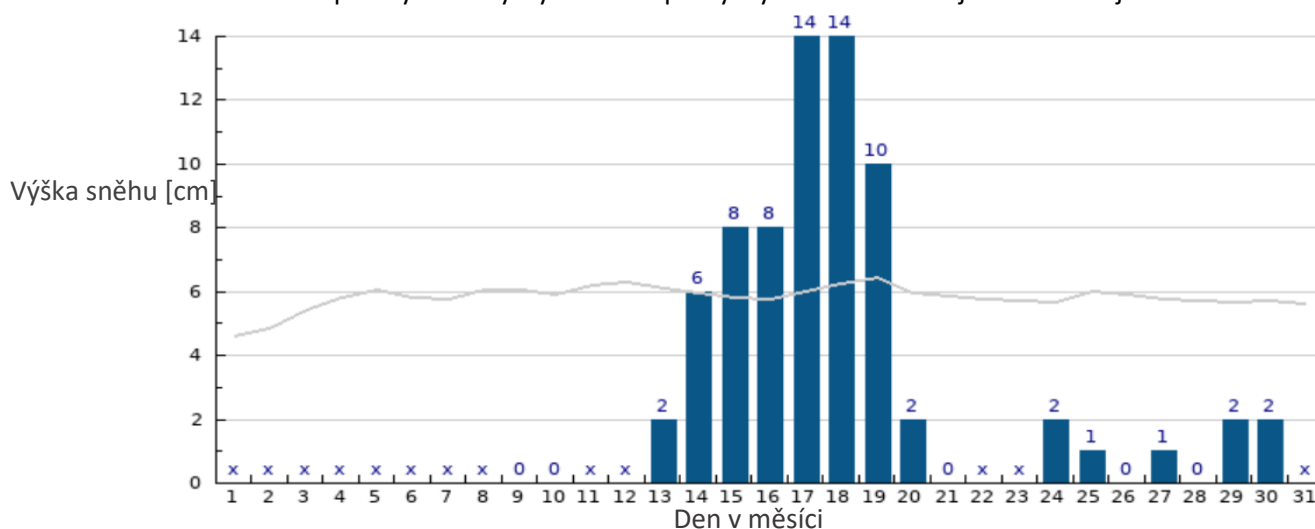
5.1.3. Výroba za měsíc leden

V lednu vyrobila fotovoltaická elektrárna 224,08 kWh. Jedná se o nejmenší měsíční hodnotu vyrobené energie za celý rok. Je jisté, že v období duben – září bude v každém měsíci vyrobené energie více. Aplikace PV GIS předpokládala nejmenší výrobu v prosinci, tudíž se v tomto s reálnými daty rozchází. Pro leden byla modelem předpovězena výroba 640,99 kW. FVE se tedy dostala pouze na 34,9 % svého potenciálu, což je nejméně ze všech sledovaných měsíců.



Obr. 31: Graf desetiminutových hodnot vyrobené energie za měsíc leden.

Z grafu měsíční výroby je patrný den, kdy byla vrcholová desetiminutová hodnota vyrobené energie. Bylo to 9. ledna, kdy byla zaznamenána hodnota 1552,96 Wh. Zajímavostí na tomto grafu jsou dny kolem poloviny měsíce, konkrétně mezi 13. až 19. ledna, kdy byla zaznamenána denní výroba ve stovkách watthodin. Za celý tento sedmidenní úsek bylo vyrobeno 1448,47 Wh, což je méně než desetiminutová vrcholová hodnota 9. ledna. Z meteorologických dat ze stanice Ostrava-Mošnov vyplývá, že v tomto období leželo v Ostravě 6 až 14 centimetrů sněhu, který bránil dopadajícímu záření na fotovoltaické panely. Graf výšky sněhové pokrývky za měsíc leden je na následujícím obrázku.



Obr. 32: Lednová výška sněhové pokrývky na stanici ČHMÚ v Ostravě-Mošnově. [10]

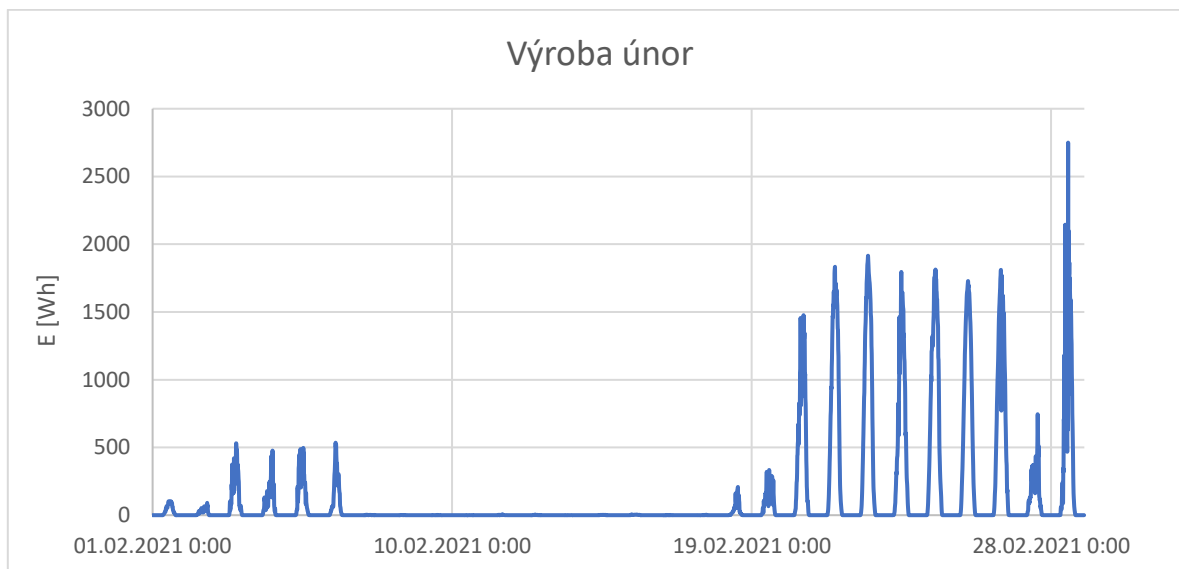
Tabulka 20: Výroba částí elektrárny měřena přes jednotlivé MPPT regulátory za leden.

Regulátor	Energie (kWh)
MPPT1	36,55
MPPT2	56,42
MPPT3	45,38
MPPT4	47,43
MPPT5	38,3
Celkem	224,08

Nejproduktivnější částí FVE byla v lednu část 2. Vyrobita 56,52 kWh. Naopak nejméně energie vyrobila část FVE1. Rozdíl mezi FVE 1 a 2 bylo bezmála 20 kWh. Stejně jako v prosinci bylo naměřeno nejvíce vyrobené energie u MPPT 2 a nejméně u MPPT 1.

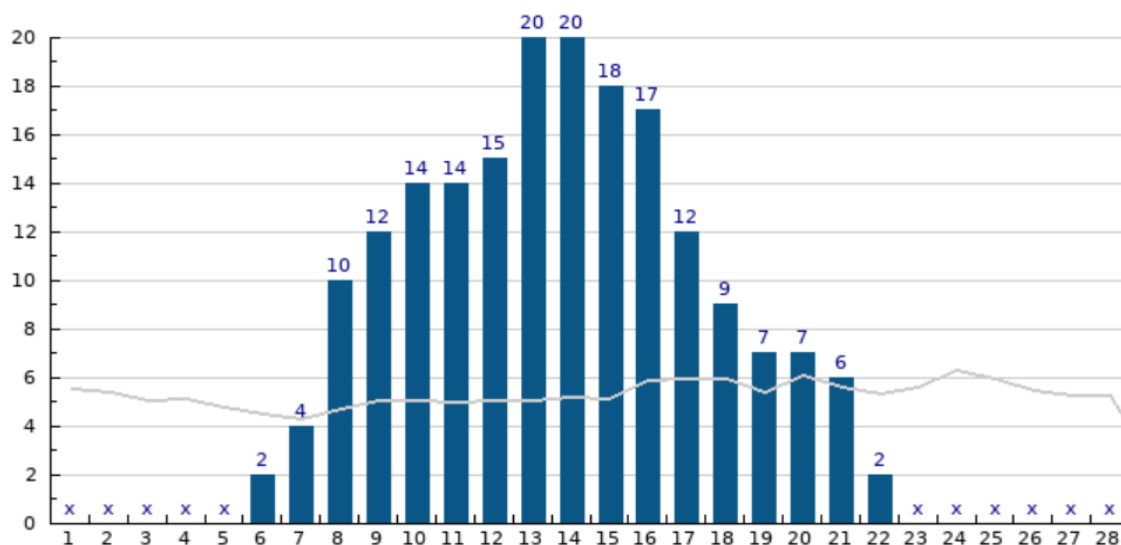
5.1.4. Výroba za měsíc únor

Za měsíc únor fotovoltaická elektrárna vyrobila 508,76 kWh energie. PV GIS předpokládal maximální únorovou výrobu 985,95 kWh. FVE naplnila svůj výrobní potenciál na 51,6 %. Větší výrobě zabránila opět sněhová pokrývka, která byla ještě vydatnější než v lednu.



Obr. 33: Graf desetiminutových hodnot vyrobené energie za měsíc únor.

Poslední únorový den, tedy 28. 2. byla zachycená nejvyšší desetiminutová hodnota vyrobené energie, která měla velikost 2749,85 Wh. Naopak mezi 7. až 17. únorem Ostravu zasypal sníh, tudíž se panelům nedostávalo potřebného slunečního záření, kterému bránila sněhová pokrývka dosahující až ke 20 centimetrům. Za celé toto období FVE vyrobila pouhých 1535 Wh. Na následujícím obrázku lze vidět jasná souvislost v době, kdy podle dat ČHMÚ ležel v Ostravě sníh, byla výroba fotovoltaické elektrárny téměř nulová. Šedou křivkou, která protíná graf, je znázorněna dlouhodobá průměrná výška sněhové pokrývky pro daný den. Je tedy zřejmé, že v tomto období byla sněhová pokrývka v Ostravě až trojnásobná oproti průměru.



Obr. 34: Únorová výška sněhové pokrývky na stanici ČHMÚ v Ostravě-Mošnově. [10]

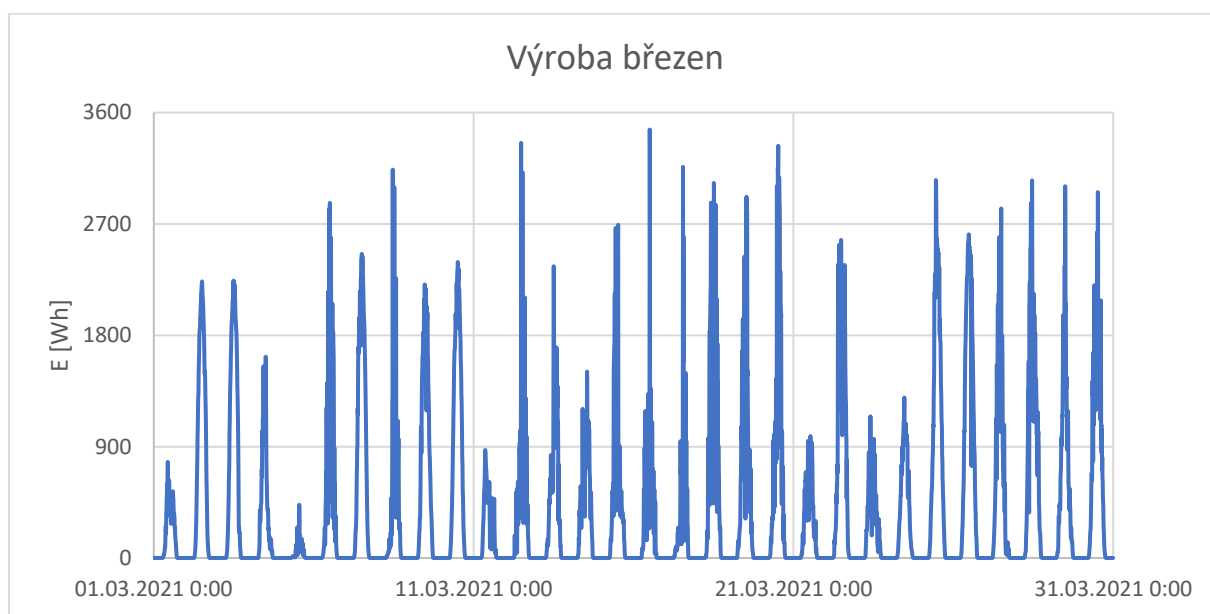
Tabulka 21: Výroba částí elektrárny měřena přes jednotlivé MPPT regulátory za únor.

Regulátor	Energie (kWh)
MPPT1	91,96
MPPT2	113,4
MPPT3	122,3
MPPT4	104,5
MPPT5	76,6
Celkem	508,76

V únoru byla část FVE, připojena k MPPT 3, nejvýkonnější. Celkem bylo za celý únor regulátorem MPPT 3 zachyceno 122,3 kWh energie. Pro srovnání je to dvojnásobek vyrobené energie, než vyrobila nejproduktivnější část FVE v lednu (56,42 kWh). Nejméně energie bylo zachyceno regulátorem MPPT 5, ovšem tato část i tak vyrobila o 20 kWh více než zmiňovaná nejproduktivnější část FVE v lednu. Celkově byl potom únor, i přes výpadek výroby kvůli sněhové pokrývce, druhý nejproduktivnější měsíc ze sledovaného období listopad 2020 – březen 2021.

5.1.5. Výroba za měsíc březen

Nejproduktivnějším měsícem z naměřených hodnot byl jednoznačně březen. Zlepšující se počasí, s tím vyšší podíl přímého záření k difúznímu, tzn. méně oblačných dní plus prodlužující se dny, s tím prodlužující se délka slunečního svitu, přispěly k tomu, že v tomto měsíci fotovoltaická elektrárna vyrobila 1644,9 kWh, což je více než trojnásobek únorové měsíční výroby. PV GIS předpověděl na březen produkci 1871,5 kWh, takže se FVE dostala 88 % svého potenciálu možné výroby, což je také největší podíl ze všech měsíců. Tak vysoké využití bych přičítal tomu, že v březnu nebylo žádné vydatné sněžení, které by zakrývalo panely a s největší pravděpodobností se zvětšila i spotřeba celé budovy, tudíž se již nenacházela v tak omezeném provozu jako měsíce předešlé. Předpokládám, že v dalších měsících by se reálna výroba ještě více blížila modelové předpovědi PV GISu, hlavně pokud by se vrátili studenti do školy a probíhala by zde výuka, další testy a zkoušky na univerzitních projektech, které by zvýšily spotřebu elektrické energie budovy, což by nutilo fotovoltaický systém produkovat elektrickou energii ve své maximální možné míře.



Obr. 35: Graf desetimínutových hodnot vyrobené energie za měsíc březen.

Nejproduktivnějším dnem a zároveň dnem s nejvyšší desetiminutovou hodnotou vyrobené energie byl 16. březen, kdy vrcholová hodnota dosáhla 3462,75 Wh. Nejméně energie bylo vyprodukováno elektrárnou 5. března. Tento den bylo zataženo, tudíž difúzní záření převládalo nad přímým, sněžilo a teploty se dostaly jen ke 3 stupňům. Panely tak mohly být chvílemi pokryty popraškem sněhu, který bránil větší produkci. Lze si všimnout, že maximální denní hodnoty jsou v průměru o dost větší než v ostatních měsících, což dává v celku jasný důvod k tomu, označit březen za nejproduktivnější měsíc ve sledovaném období. Rozdělení výroby na jednotlivé MPPT regulátory je v následující tabulce.

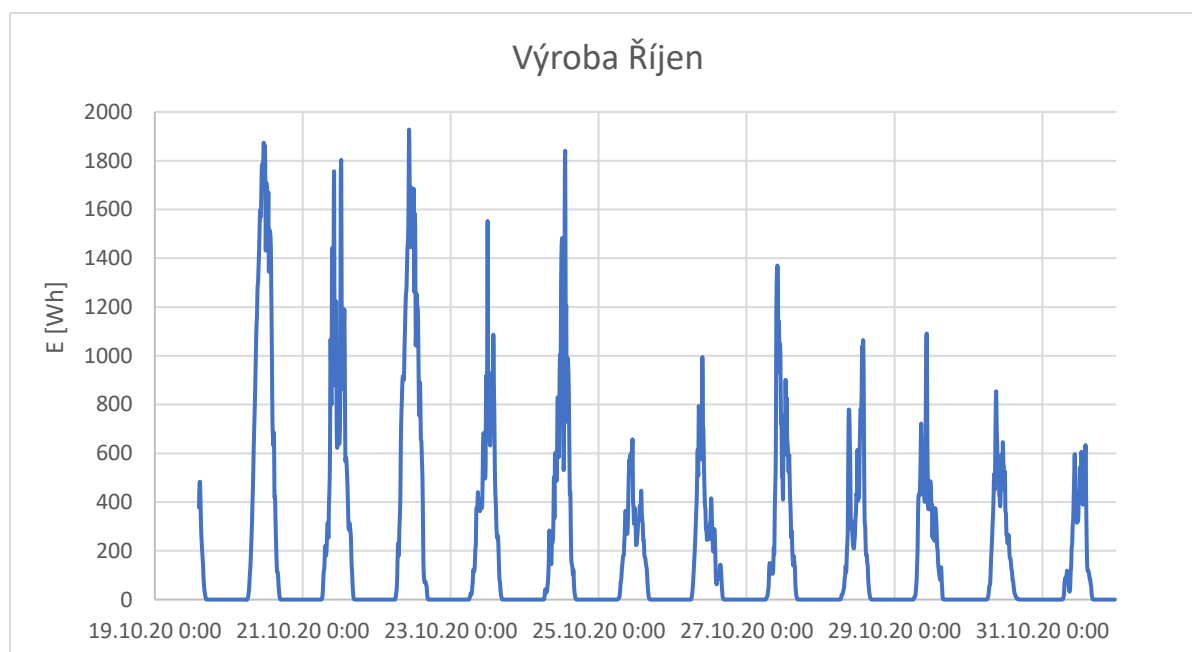
Tabulka 22: Výroba částí elektrárny měřena přes jednotlivé MPPT regulátory za březen.

Regulátor	Energie (kWh)
MPPT1	290,5
MPPT2	391,4
MPPT3	354,9
MPPT4	308,3
MPPT5	299,8
Celkem	1644,9

Nejvyšší hodnotu elektrické energie vyrobila část FVE připojena k regulátoru MPPT 2. Konkrétně to bylo 391,4 kWh. Na tuto hodnotu výroby v lednu a v prosinci nedosáhla celá fotovoltaická elektrárna. Nejméně produktivní byla v březnu část s MPPT regulátorem 1, která vyrobila 290,5 kWh. Tato hodnota je i přesto vyšší než celková měsíční výroba za leden a prosinec.

5.1.6. Výroba za měsíc říjen

Tento měsíc záměrně zmiňuji jako poslední z důvodu, že naměřená data existují až od 19. října. I tak lze z těchto dat vyčíst určité informace. Za 12 říjnových dní elektrárna vytvořila více elektrické energie než za celý leden a prosinec. Stejně jako v březnu, dny v říjnu nejsou ještě tak krátké jako v prosinci a v lednu, s tím souvisí samozřejmě sluneční záření. V prosinci nastal tzv. zimní slunovrat, kdy rozdíl mezi východem a západem slunce je pouze 8 hodin a 6 minut. Loňský rok byl tedy 21. prosinec nejkratším dnem v roce. Zatímco 22. října bylo slunce na obloze 10h 28m.



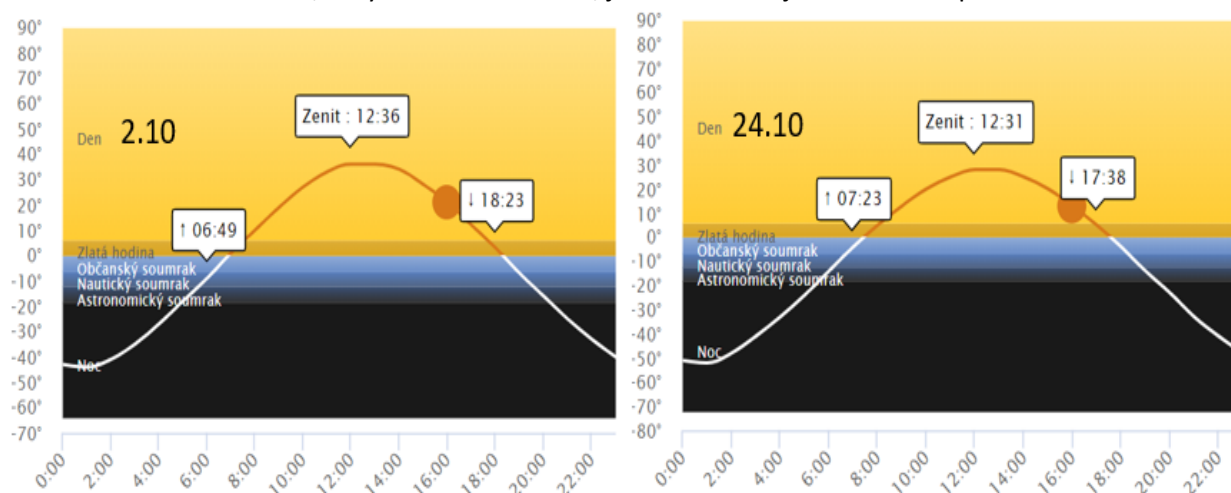
Obr. 36: Graf desetimínutových hodnot vyrobené energie za měsíc říjen.

Nejproduktivnější den z části října, ze které mám k dispozici naměřená data, byl 22. říjen. V tento den dosáhla maximální desetiminutová hodnota vyrobené energie velikosti 1927,6 Wh. Po celý den bylo skoro jasno s teplotami okolo 16 stupňů, tudíž přímé sluneční záření nemělo moc překážek ve svém směru k fotovoltaickým panelům. Monitoring byl spuštěn 19. října v odpoledních hodinách, proto je první den v grafu neúplný.

Tabulka 23: Výroba části elektrárny měřena přes jednotlivé MPPT regulátory za říjen.

Regulátor	Energie (kWh)
MPPT1	64,27
MPPT2	82,17
MPPT3	74,71
MPPT4	66,5
MPPT5	61,5
Celkem	349,14

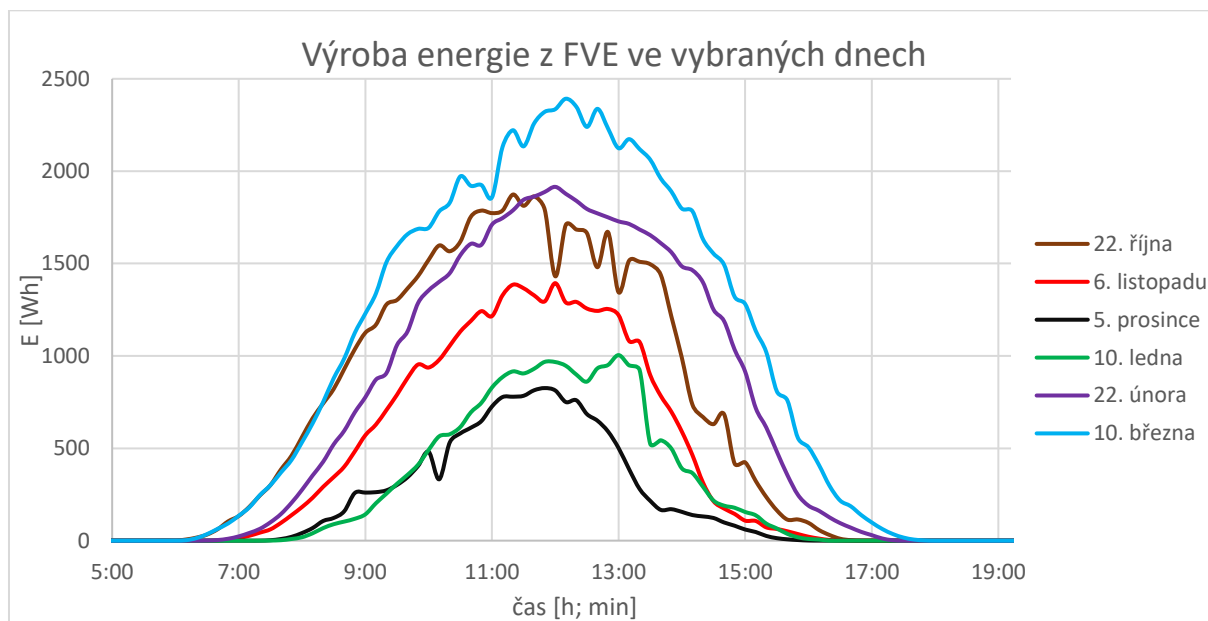
Stringy připojené k MPPT 2 vyrobily ve zmiňované části října nejvíce energie, konkrétně 82,17 kWh. Nejmenší produkci naopak zaznamenaly stringy připojené k MPPT 5. Celková vyrobená elektrická energie byla 349,15 kWh. Na kolik procent svého potenciálu elektrárna dosáhla, nemohu hodnotit, protože nemám kompletní data z celého měsíce. Aplikace PV GIS předpověděla výrobu 1559,71 kWh energie. Podle mého mínění by za měsíc říjen byla vyrobená energie někde mezi 1100 až 1200 kWh, což by odpovídalo 75 % využití své maximální možné vyrobené energie. K tomuto odhadu jsem dospěl za předpokladu, že by byla denní spotřeba podobná té z poslední třetiny října a s vědomím toho, že doba slunce nad obzorem, tedy slunečního záření, je na začátku října o hodinu a půl delší než na konci.



Obr. 37: Porovnání délky slunečního svitu ve dnech 2.10. a 24.10. [11]

5.2. Srovnání vybraných dní z každého měsíce

Pro srovnání denní výroby jsem si vybral z každého měsíce jeden den. Pro výběr správných dnů jsem využil archivu počasí Českého hydrometeorologického ústavu a vybral jsem si jasné až skoro jasné dny, kdy byla na obloze minimální oblačnost bez srážek. Zvolil jsem si 22. října, 6. listopadu, 5. prosince, 10. ledna, 22. února a 10. března. Hodnoty denní výroby elektrické energie z fotovoltaické elektrárny z těchto dní jsem vložil do následujícího grafu.



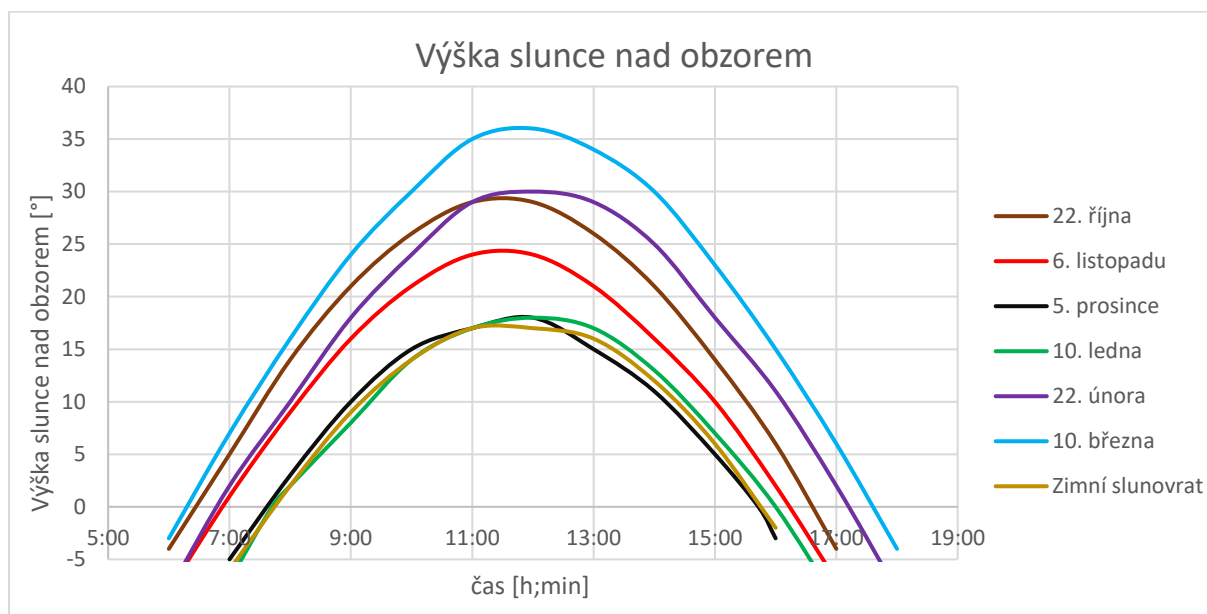
Obr. 38: Denní výroba energie ve vybraných dnech.

Z grafu na obrázku 38 je patrné, jak se zkracuje doba produkce energie se zkracujícími se dny. Nejkratší čas FVE vyráběla elektrickou energii 5. prosince, kdy první zachycená hodnota energie MPPT regulátory byla v 7:10. Poslední hodnota byla zaznamenána v 16:20. Elektrárna byla ve výrobním stavu pouze devět hodin a deset minut. Druhá nejkratší doba výroby z těchto dní byla 10. ledna. FVE začala produkovat elektrickou energii v 7:20, což bylo ještě o 10 minut později než 5. prosince, ale naopak odpoledne probíhala výroba až do 16:40. V celku byla tedy doba výroby 10. ledna delší o deset minut, než 5. prosince. Není žádným překvapením, že tyto dva měsíce patří k nejméně produktivním z celého roku, protože právě v těchto měsících je slunce na obloze nejkratší dobu a noci jsou nejdelší. Mezi 5. prosincem a 10. lednem také nastává zimní slunovrat. V roce 2020 tento den nastal 21. prosince, kdy po nejkratším dni nastala nejdelší noc. V tento den je slunce nejnižší nad obzorem, pouhých 17 stupňů, tudíž paprsky dopadají směrem k vodorovné ploše pod nejnižším úhlem za celý rok. Pro srovnání jsem vytvořil graf, kde je zaznamenána denní dráha slunce nad obzorem. V grafu se nachází dráhy slunce z vybraných dní a dráha slunce při zimním slunovratu 21. prosince. Lze si všimnout, že výška nad obzorem je v tento den opravdu nejnižší ze všech vybraných dní, i když mu 5. prosinec a 10. leden zdatně sekundují a slunce se v tyto dny dostalo jen o něco málo výše.

Třetí nejkratší doba výroby z mnou vybraných dní nastala 6. listopadu. V tento den začaly první paprsky dopadat na pole panelů v 6:30. Poslední hodnota vyrobené energie byla zaznamenána v 16:50. Doba výroby v tento den dosáhla na 10 hodin a 20 minut, což je o více než hodinu delší čas, než v případě 5. prosince a 10. ledna. Na podzim se s přibývajícím dnem zároveň zkracuje doba slunečního záření a s tím i doba, kdy fotovoltaický systém dokáže měnit sluneční energii na elektrickou. Toto tvrzení dokládají i hodnoty z 22. října, což je oproti 6. listopadu jen 15 dní rozdíl. V tento den začala produkce FVE v 6:00 a trvala až do 17:00, tedy přesně 11 hodin. Za 14 dní se délka slunečního svitu, který je důležitý pro výrobu fotovoltaické elektrárny, snížila o celých 40 minut. Ještě razantnější rozdíl

je potom mezi 6. listopadem a 5. prosincem. Rozdíl mezi těmito dny je měsíc a za tuto dobu se zkrátila doba slunečního svitu z 10 hodin a 20 minut na 9 hodin a 10 minut. Rozdíl mezi těmito dny je tedy přes hodinu.

Podobnou délku slunečního záření jako 22. října můžeme najít i 22. února. V tento den začaly MPPT regulátory registrovat první vyrobenou energii v 6:20. Poslední sluneční paprsky zachytily fotovoltaické panely v 17:20, tudíž celková doba slunečního záření dopadající na pole panelů je shodná s dnem 22. října. Pokud přihlídneme k tomu, že 31. října došlo ke změně z letního času na zimní a čas se posunul o hodinu zpátky, tak čas naměřených hodnot naznačuje, že slunce bylo na obloze ve zmiňovaných dnech velmi podobně dlouhou dobu. Trajektorie slunce v těchto dnech byla velmi podobná, což dokazuje obrázek 39. Patrný je zde časový posun, kdy 22. října slunce o hodinu dříve vyšlo, ale 22. února zase o hodinu později nastal západ. Maximální výška slunce nad obzorem v Ostravě byla 22. října 29°, 22. února se slunce dostalo ještě o stupeň výše ve 12:00 na 30°.

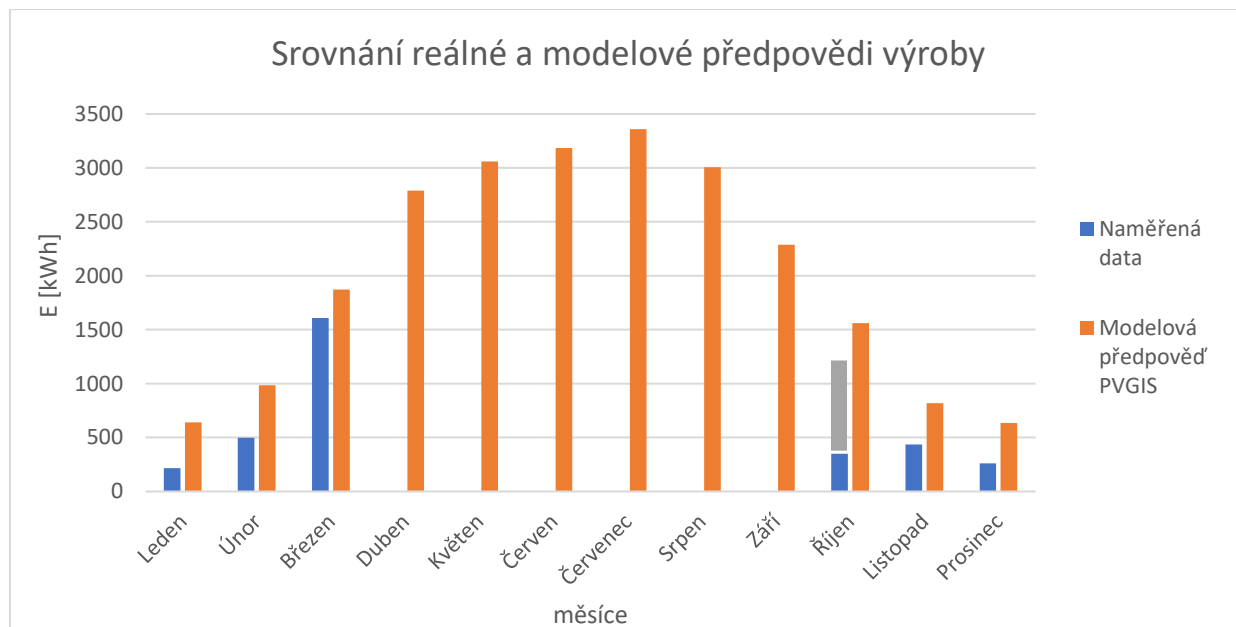


Obr. 39: Výška slunce nad obzorem.

S přibývajícím datem od zimního slunovratu roste také délka dne, jinými slovy slunečního svitu (záření). Tento fakt demonstruje nejvýrazněji křivka pro 10. březen. V tento den začala fotovoltaická elektrárna produkovat energii již v 6:00. Poslední zachycené sluneční paprsky polem panelů byly zaznamenány v 17:50. FVE tedy produkovala elektrickou energii celých 11 hodin a 50 minut. Z této hodnoty si lze povšimnout, že těsně po 10. březnu nastala jarní rovnodennost. Konkrétně v roce 2021 nastala jarní rovnodennost 20. března. V tento den je slunce nad obzorem přesně 12 hodin, což znamená, že den je stejně dlouhý jako noc. Pokud porovnáme z těchto vybraných dní den s nejdelší a nejkratší dobou denní produkce, zjistíme, že rozdíl mezi 10. březnem a 5. prosincem jsou 2 hodiny a 40 minut. Délka slunečního záření je jedním z důvodů, proč zimní měsíce takto zaostávají v množství vyrobené elektrické energie. Za tyto necelé tři hodiny, což je rozdíl mezi 10. březnem a 5. prosincem, dokáže elektrárna v případě dobrého počasí vyrobit i jednotky kWh. Toto je srovnání jednoho z nejkratších dnů v roce pouze se dnem v polovině března. Ještě výraznější rozdíl by nastal, pokud by se 5. prosinec porovnával s jakýmkoliv dnem v červnu, kdy jsou dny naopak nejdelší. Např. při letním slunovratu v roce 2020 slunce vycházelo ve 4:43 a západ nastal v 20:55. Sluneční paprsky dopadaly na fotovoltaické panely 16 hodin a 12 minut, což je oproti 5. prosinci nárůst o 77 %. Grafy na obrázku 38 a 39 k sobě navzájem korelují, což dokazuje závislost délky výroby elektrické energie z fotovoltaické elektrárny na délce slunečního záření.

5.3. Grafické srovnání naměřených dat s modelovou předpovědí PV GIS

Na závěr mé diplomové práce ještě graficky porovnáám naměřená data s modelovou předpovědí PV GISu.



Obr. 40: Srovnání naměřených dat s modelovou předpovědí.

Jak již bylo naznačeno výše, absolutní hodnoty měsíční výroby nelze s velkou pravděpodobností relevantně porovnat. Při tomto porovnání se tedy zaměřím pouze na trend měsíční hodnoty vyrobené energie celého fotovoltaického systému. Pokud se podíváme na měsíc říjen, ze kterého nejsou kompletní naměřená data k dispozici, zjistíme, že se vymyká trendu, kdy s přibývajícím měsíci roste celková měsíční výroba. To ovšem neplatí v případě, kdy jsem odhadl výrobu prvních dvou třetin měsíce (šedá barva). S tímto subjektivním odhadem na základě několika podmínek, které nemusí být splněny na 100 %, je patrný trend stejný jako předpovídá PV GIS, kdy se s přibývajícím se měsíci snižuje měsíční výroba. Musím podotknout, že tento trend platí jen pro druhou polovinu roku. Maximální možná výroba fotovoltaické elektrárny klesá od srpna do prosince.

Pokud se posuneme do roku 2021, tak pomocí naměřených dat lze vidět, že výroba předpokládaná modelovou předpovědí PV GIS počítá s nárůstem každý měsíc od ledna až právě do zmiňovaného července. Tento trend potvrzují i naměřená data reálné výroby. S přibývajícím měsíci dokonce roste i procentuální využití maximálního možného výkonu elektrárny, kdy se v březnu dostala již na 88 % hodnoty předpovězené aplikací PV GIS.

6. Závěr

Cílem této diplomové práce bylo porovnání modelových výsledků předpovědi výroby elektrické energie z hybridní fotovoltaické elektrárny na nové budově centra pokročilých inovačních technologií, která byla dostavěna v roce 2020 v areálu VŠB – TU Ostrava v Ostravě-Porubě.

První část se zabývá zmiňovanou budovou, na jejíž střeše je samotná fotovoltaická elektrárna. Čtenář se zde dozvídá o účelu a ceně stavby, celkové charakteristice budovy a jejím technologickém vybavení. Je zde také vysvětleno, na jakých projektech by se zde v budoucnu mohlo pracovat a pro které studijní obory a zaměření je především tato budova koncipována.

V druhé kapitole jsem popisoval fotovoltaický systém. Je zde zachyceno pole panelů z ptací perspektivy, dále popsán funkční systém elektrárny se schématem pro lepší pochopení zapojení celého systému. Také jsou zde uvedeny základní informace jako je instalovaný výkon elektrárny nebo kapacita bateriového uložště.

Třetí kapitola pojednává o webové aplikaci, kterou jsou použil k modelové předpovědi výroby fotovoltaického systému. Pomocí aplikace PV GIS lze předpovídat celkovou roční výrobu elektrické energie. V této části diplomové práce dále vysvětluji, jaké databáze dat jsou zde k dispozici a jaké nástroje výpočtu lze použít. Dále je zde popsáno, že PV GIS dokáže poskytnout data typického meteorologického roku či průměrného ročního, měsíčního i denního slunečního záření podle historických dat z několika předchozích let.

Čtvrtá kapitola se týká práce v PV GISu. Do srovnání jsem dal tři databáze dat. Jmenovitě SARAH, COSMO a ERA 5. Rozdíl v těchto databázích jsem vysvětloval ve třetí kapitole. Jelikož do nástroje výpočtu lze dát pouze jednu hodnotu orientace panelů směrem k jihu, musel jsem zde pole panelů rozdělit na sekci A a B. Simulace tedy probíhala samostatně a pro výsledek celkové výroby jednotlivých databází jsem výsledky sekce A a B sečetl. Na konci kapitoly jsem srovnal výsledky jednotlivých databází z několika pohledů a vyhodnotil nejlepší databázi pro srovnání s reálně naměřenými daty. Součástí této kapitoly jsou grafy a tabulky hodnot, které vygeneroval PV GIS po zadání potřebných vstupních parametrů.

V poslední kapitole jsem popisoval naměřená data. Obsahem jsou výstupy z měření, data zobrazená v grafech a tabulkách a popis výsledků. Je zde popsán interaktivní systém školy, ve kterém lze kdykoliv pozorovat výrobu z fotovoltaické elektrárny. Dále jsem zde do grafů zachytil měsíční výrobu pro každý měsíc, ze kterých jsem měl naměřené hodnoty. Jednotlivé měsíce jsem porovnával s modelovou předpovědí PV GIS a snažil jsem se najít důvody rozdílu mezi skutečnou a nasimulovanou výrobou. Další srovnání se týká závislosti hodnoty vyrobené energie za celý den na délce denního slunečního záření. Vysvětleno je zde pomocí grafu, proč jsou zimní měsíce nejméně produktivní z celého roku, i když z teorie víme, že letní teploty pro panely nejsou zcela ideální a klesá jejich účinnost, naopak s klesající teplotou je účinnost lepší. V posledním srovnání v této kapitole jsem se zaměřil na trend výroby během roku. Podle grafu bylo patrné, že naměřené hodnoty výroby odpovídají rostoucímu trendu od ledna do března a zároveň klesajícímu trendu od října do prosince.

Srovnání odhadovaných a naměřených dat není objektivní z důvodu, že se jedná o novou budovu, která byla uvedena do provozu na začátku akademického roku. Hodnoty vyrobené energie byly navíc ovlivněny sněhovou pokrývkou. Obrázek 27 z místa FVE dokazuje, že v projektové dokumentaci se zanedbal vliv zastínění sněhem a konstrukcí budovy. Podle mého názoru by k odstranění vlivu tohoto zastínění stačilo, kdyby byly panely instalovány na vyšších betonových podstavcích, popřípadě na podstavcích z jiného materiálu z důvodu nosnosti střechy.

Výsledky dosti ovlivnila i celosvětová pandemie. Ostrovní systém je závislý na okamžité spotřebě všech spotřebičů v systému. V období říjen – březen naneštěstí probíhala výuka na dálku, tudíž budova zatím nebyla využívána tak, jak se předpokládalo. Při úvaze z finančního hlediska se může zdát, že instalovaný výkon fotovoltaické elektrárny je zbytečně předimenzovaný, když procentuální využití maximální možné výroby dosahoval v lednu pod 40 %. Z tohoto důvodu by bylo relevantnější srovnání naměřených dat výroby FVE s modelovou předpovědí PV GIS za celý rok a za podmínek, že by probíhala klasická výuka a spotřeba celého komplexu by dosahovala předpokládané hodnoty, se kterou se počítalo při návrhu fotovoltaického systému. Z naměřených dat nám napovídá měsíc březen, že elektrárna by za takových podmínek naplnila svůj potenciál. Ten by byl také z větší části naplněn, než napovídají naměřené hodnoty, pokud by se v zimních měsících s nadprůměrnou sněhovou pokrývkou prováděla údržba a sníh by z fotovoltaických panelů odstraněn. Někdo by mohl namítat, zda je aplikace PV GIS dostatečně vhodná pro předpověď výroby při projektování nových fotovoltaických elektráren. Podle mého názoru je to jedna z nejlepších aplikací v tomto oboru, která usnadňuje projektantovi jeho práci. Předpovědi jsou počítány z historických meteorologických hodnot pro dané místo za několik let, které poskytují mezinárodní organizace. Data pro některé části světa v aplikaci sice ještě chybí, ale pro místa v Evropě bych PV GIS při projektování nové fotovoltaiky doporučil.

Literatura

1. Platforma nových technologií FEI CPIT TL3 [online]. Dostupné z: <https://www.fei.vsb.cz/cs/pr/platforma-novych-technologii-fei-cpit-tl3/> [cit. 18.02.2021]
2. Platforma nových technologií FEI CPIT TL3 [online]. Dostupné z: <https://ridera-stavebni.cz/reference/platforma-novych-technologii-fei-cpit-tl3/> [cit. 19.02.2021]
3. VŠB – TUO Platforma nových technologií CPIT – TL3, Ostrava – Poruba [online]. Dostupné z: <http://www.stavbaroku.cz/printDetail.do?Dispatch=ShowDetail&siid=1912> [cit. 20.02.2021]
4. *Platforma nových technologií CPIT-TL3 FOTOVOLTAIKA, A1.Technická zpráva, Skutečné provedení.* Tomáš Vocílka, 2019. 13 s.
5. Photovoltaic Geographical Information System [online]. Dostupné z: JRC Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS) - European Commission (europa.eu) [cit. 19.10.2020]
6. *Platforma nových technologií CPIT-TL3 FOTOVOLTAIKA, C3_SKUTEČNÉ_PROVEDENÍ.* Tomáš Vocílka, 2019. 9 s.
7. *Platforma nových technologií CPIT-TL3 FOTOVOLTAIKA, C4_SKUTEČNÉ_PROVEDENÍ.* Tomáš Vocílka, 2019. 4 s.
8. Seznamte se – Fakulta elektrotechniky a informatiky [online]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=qkFo9uBacYA> [cit. 19.03.2021]
9. VŠB – Technická univerzita Ostrava Centrum ENET [online]. Dostupné z: <http://visenet.vsb.cz/workspace/main.htm> [cit. 15.04.2020]
10. IN-POČASÍ [online]. Dostupné z: https://www.in-pocasi.cz/archiv/ostrava/?&typ=snih&historie_bar_mesic=1&historie_bar_rok=2021#monthly_graph [cit. 18.04.2021]
11. METEOGRAM [online]. Dostupné z: <https://www.meteogram.cz/vychod-zapad-slunce/> [cit. 20.04.2021]